



TESIS - RC 185401

**EFEKTIVITAS DESAIN *SURGE TANK* UNTUK  
MENGENDALIKAN EFEK *WATER HAMMER* PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR**

ANINDITA HANALESTARI SETIAWAN  
03111750050010

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc

PROGRAM MAGISTER  
MANAJEMEN REKAYASA SUMBER AIR  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018





TESIS - RC 185401

**EFEKTIVITAS DESAIN *SURGE TANK* UNTUK  
MENGENDALIKAN EFEK *WATER HAMMER* PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR**

ANINDITA HANALESTARI SETIAWAN  
03111750050010

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc

PROGRAM MAGISTER  
MANAJEMEN REKAYASA SUMBER AIR  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018





THESIS - RC 185401

# **EFFECTIVITY OF SURGE TANK DESIGN TO CONTROL WATER HAMMER EFFECT IN HYDRO- ELECTRIC POWER PLANT SYSTEM**

ANINDITA HANALESTARI SETIAWAN  
03111750050010

SUPERVISOR  
Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc

MAGISTER PROGRAM  
WATER RESOURCES ENGINEERING AND MANAGEMENT  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL, AND GEO-ENGINEERING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018



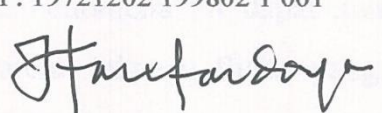
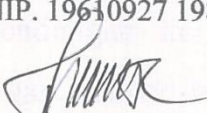
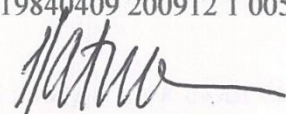


**Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (MT)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**oleh:  
Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. 03111750050010**

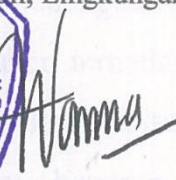
**Tanggal Ujian : 7 Januari 2019  
Periode Wisuda : Maret 2019**

Disetujui oleh:

- 
1. Prof. Dr. Ir. Nadjadji A., M.Sc (Pembimbing)  
NIP. 19540113 198010 1 001
  2.   
2. Dr. techn. Umboro L., S.T., M.Sc (Penguji)  
NIP. 19721202 199802 1 001
  3.   
3. Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc (Penguji)  
NIP. 19610927 198701 1 001
  4.   
4. Dr. Mahendra Andiek M., S.T., M.T. (Penguji)  
NIP. 19840409 200912 1 005
  5.   
5. Dr. Ir. Edijatno, CES, DEA (Penguji)  
NIP. 19520311 198003 1 003

Dekan Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan



  
Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D  
NIP. 19750212 199903 2001

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **EFEKTIVITAS DESAIN *SURGE TANK* UNTUK MENGENDALIKAN EFEK *WATER HAMMER* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA AIR**

Nama Mahasiswa : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP : 03111750050010  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc

### **ABSTRAK**

*Water hammer* adalah fenomena yang terjadi pada saluran perpipaan tertutup ketika kecepatan dan aliran air berubah akibat penutupan saluran secara tiba-tiba. Fenomena ini dapat mengakibatkan kerusakan pipa (*bursting of pipe lines*) karena tekanan fluida yang sangat tinggi. Kasus kerusakan pipa banyak terjadi pada pipa berdimensi panjang seperti pipa *penstock* yang menyalurkan air dari bendungan ke rumah pembangkit (*power house*) pada sistem PLTA bendungan. Untuk mengurangi efek dari *water hammer* pada pipa *penstock*, digunakan bangunan *surge tank* sebagai peredam energi dari tekanan air di dalam pipa.

Alat *surge tank* akan digunakan sebagai model fisik untuk simulasi kondisi hidrolika. Alat ini dilengkapi dengan dua tempat tampungan, pipa *penstock*, pipa *surge tank*, dan katup (*valve*) pada bagian ujung pipa. Tampungan pertama pada alat *surge tank* mewakili volume dari *inflow* sungai, sedangkan tampungan kedua mewakili fungsi *reservoir*. Pengamatan akan dilakukan terhadap tinggi muka air dan waktu osilasi air pada pipa *surge tank* setelah katup ditutup secara cepat. Penelitian *surge tank* dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi alternatif sebagai model, yaitu perubahan panjang pipa *penstock* dan diameter pipa *surge tank*.

Pada penelitian ini, dimodelkan dua variasi diameter pipa *surge tank* dan tiga panjang pipa *penstock* dengan dua jenis aliran. Variasi dilakukan dengan mengubah pemasangan diameter alat *surge tank* dan panjang pipa *penstock*.

Parameter yang diamati pada penelitian ini adalah elevasi muka air pada pipa *surge tank* dan waktu aliran mencapai *steady state flow* saat terjadi fenomena *water hammer*. Berdasarkan hasil analisis, diameter pipa *surge tank* memengaruhi tinggi muka air pada *surge tank*. Semakin luas permukaan pipa *surge*, maka amplitudo osilasi air akan semakin rendah. Variasi d1 menghasilkan perbedaan tinggi muka air hingga 21,5 cm lebih rendah dari variasi d2. Panjang pipa *penstock* juga berpengaruh elevasi muka air pada pipa *surge* dan dalam menentukan waktu osilasi massa. Semakin panjang pipa *penstock*, maka waktu yang diperlukan aliran air untuk bertransmisi akibat *water hammer* akan semakin lama. Aliran air pada pipa tertutup juga dipengaruhi oleh gaya gesek air dengan pipa yang menyebabkan kehilangan energi. Hal ini akan memengaruhi kecepatan aliran dan waktu transmisi air di dalam pipa. Hubungan antara elevasi muka air pada *surge tank* dan waktu *steady state* menghasilkan persamaan eksponen regresi asimtot. Dari penelitian ini, diperoleh desain *surge tank* dengan variasi yang dapat menurunkan amplitudo osilasi air pada pipa *surge tank* dengan waktu *steady state* yang paling cepat. Model dengan diameter pipa *surge* 7,64 cm dan panjang *penstock* 1,56 m adalah model *surge tank* yang paling efektif dalam mereduksi efek *water hammer*.

**Kata kunci:** *water hammer, surge tank, hydro-electric power plant, osilasi massa.*

# **EFFECTIVITY OF SURGE TANK DESIGN TO CONTROL WATER HAMMER EFFECT IN HYDRO-ELECTRIC POWER PLANT SYSTEM**

Student's Name : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP : 03111750050010  
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc

## **ABSTRACT**

Water hammer is a phenomenon that happens in closed conduits when the water velocity and flow changes because of the sudden closed. This phenomenon can cause the bursting of pipe by the very high fluidal pressure. The cases of bursting pipe often happen on the long dimensional pipes such as penstock that distributes water from reservoir to the power house in hydroelectric power plants system. To reduce the water hammer effect in the penstock, surge tank is used as an energy reducer.

Surge tank would be used as a physical model to simulate hydraulic condition. This model is equipped with two container boxes, penstock, surge tank pipe, and a valve at the end of the pipe. The first container represents volume from inflow, meanwhile the second container acts as the reservoir. The observation comprises of water level and mass oscillation in surge tank after the valve is closed rapidly. Fluctuation of mass oscillation in surge tank is temporary until the water level reaches its steady state level and represents the water level of upstream condition. The research of surge tank would use some alternative variants as parameters, such as the length of penstocks and surge tank pipe's diameter.

In this research, two variations of surge tank diameter and three different length of penstock pipes with two kind of flows are being observed. These variations will be installed in the surge tank model. The parameters of this research are water level in the surge tank and the wave travel time to reach steady state flow when water hammer phenomenon occurs. Diameter of surge tank affects water level

because of its surface area. The amplitude of water oscillation will be decreased as the surface area of surge tank increases. When  $d_1$  is used, it resulted in decreasing the water level to 21,5 cm lower than the result of  $d_2$ . The length of penstock governs the elevation of water level and water oscillation time. Penstock with longer size will make the longer time for wave transmission to propagate along the pipe. Furthermore, the friction factor takes role in the head loss and wave time travel in penstock. Subsequently, the relation of water level and steady state reaching time would be determined as an asymptot regression of exponential equation. The objective of this research is to design of surge tank which can decrease the water oscillation amplitude with the fastest steady state periode. Hence, the most suitable design of surge tank to reduce the effect of water hammer is by using the diameter of surge tank in 7,64 cm and length of penstock in 1,56 m.

**Keywords:** water hammer, surge tank, hydro-electric power plant, mass oscillation.

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur diucapkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Penuli dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Efektifitas Desain *Surge Tank* untuk Mengendalikan Efek *Water Hammer* pada Pembangkit Listrik Tenaga Air”. Tesis ini disusun sebagai langkah awal untuk penyelesaian tesis pada Program Studi S2 Teknik Sipil FTSP ITS Surabaya.

Penulis banyak mendapatkan saran, dukungan, bimbingan, serta bantuan dari pihak-pihak yang telah membukakan pikiran Penulis, bahwa sesungguhnya pengalaman dan pengetahuan adalah guru yang terbaik. Oleh karena itu, dengan segala hormat dan kerendahan hati, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, dan Kakak yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc (Dosen Pembimbing sejak S1); Bapak Dr. Ir. Edijatno; dan Dosen- Dosen Bidang Keairan Departemen Teknik Sipil ITS yang telah membimbing dan memberikan pelajaran yang bermanfaat selama kuliah.
3. Keluarga di jurusan yang telah memberikan semangat, senantiasa menemani, dan membantu dalam pengerjaan tugas ini.
4. Teman-teman MRSA empat serangkai yang mendukung untuk menyelesaikan tesis ini secepat-cepatnya.
5. *Go-Company* yang setia dan berjasa dalam meluncurkan mobilisasi dan mengantarkan makanan kapanpun dan dimanapun.

Dalam penyusunan tesis ini, Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dan kesalahan karena keterbatasan ilmu pengetahuan dan wawasan yang dimiliki. Oleh karena itu, Penulis memohon maaf atas segala kekurangan dan kesalahan tersebut, saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan untuk pelajaran dan perbaikan selanjutnya. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi Penulis, institusi pendidikan, dan masyarakat.

Surabaya, Desember 2018

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

|   |     |
|---|-----|
| ABSTRAK .....   | iii |
| ABSTRACT .....  | v   |
| KATA PENGANTAR .....  | vii |
| DAFTAR ISI .....  | ix  |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xii |
| BAB I .....   | 1   |
| PENDAHULUAN .....   | 1   |
| 1.1    Latar Belakang .....   | 1   |
| 1.2    Rumusan Masalah .....  | 3   |
| 1.3    Tujuan Penelitian .....  | 3   |
| 1.4    Manfaat Penelitian .....   | 4   |
| 1.5    Batasan Masalah .....  | 4   |
| BAB II .....  | 5   |
| TINJAUAN PUSTAKA .....  | 5   |
| 2.1 <i>Science of Oversight</i> .....   | 5   |
| 2.2    Pipa Bertekanan Tinggi ( <i>Pressure Pipelines</i> ) .....   | 7   |
| 2.2.1 <i>Penstock</i> .....   | 7   |
| 2.2.2 <i>Local Losses</i> atau <i>Minor Losses</i> .....  | 9   |
| 2.2.3    Hidrolika Aliran Air pada Pipa .....   | 10  |
| 2.3    Fenomena <i>Water Hammer</i> .....   | 11  |
| 2.3.1 <i>Unsteady Flow</i> atau <i>Transient Flow</i> .....   | 12  |
| 2.3.2    Perhitungan <i>Water Hammer</i> Menggunakan Formula Joukowsky<br>( <i>Joukowsky Equation</i> ) ..... | 14  |
| 2.3.3    Gelombang Percepatan <i>Water Hammer</i> .....   | 15  |
| 2.3.4    Variabel yang Mempengaruhi <i>Water Hammer</i> dan Persamaan<br>Gelombang .....                      | 15  |
| 2.4 <i>Surge Tank</i> .....   | 18  |
| 2.4.1    Tipe – Tipe <i>Surge Tank</i> .....  | 22  |
| 2.4.2    Kriteria untuk Desain <i>Surge Tanks</i> .....   | 22  |

|                            |   |    |
|----------------------------|---|----|
| 2.4.3                      | Osilasi Massa pada <i>Surge Tank</i> .....                          | 22 |
| 2.4.4                      | Perhitungan <i>Surge Tank</i> .....                                 | 24 |
| 2.5                        | Uji Konvergensi .....   | 26 |
| BAB III .....              |   | 27 |
| METODOLOGI .....           |   | 27 |
| 3.1                        | Fasilitas Penelitian .....  | 27 |
| 3.2                        | Rancangan Penelitian.....   | 29 |
| 3.2.1                      | Studi Literatur.....  | 29 |
| 3.2.2                      | Desain <i>Surge Tank (Initial Condition)</i> .....                  | 30 |
| 3.2.3                      | Perancangan Permodelan.....   | 30 |
| 3.2.4                      | <i>Running Model</i> .....  | 31 |
| 3.2.5                      | Kalibrasi .....   | 31 |
| 3.2.6                      | Pengukuran dan Pencatatan .....                                     | 31 |
| 3.2.7                      | Analisis dan Pembahasan .....                                       | 32 |
| 3.2.8                      | Kesimpulan dan Saran .....  | 32 |
| BAB IV .....               |   | 35 |
| HASIL DAN PEMBAHASAN ..... |   | 35 |
| 4.1                        | Analisis Desain <i>Surge Tank</i> .....                             | 35 |
| 4.1.1                      | Analisis Variasi Debit.....   | 37 |
| 4.1.2                      | Analisis Variasi Diameter Pipa <i>Surge Tank</i> .....              | 38 |
| 4.1.3                      | Analisis Variasi Panjang Pipa <i>Penstock</i> .....                 | 39 |
| 4.2                        | Metode Penelitian .....   | 39 |
| 4.3                        | Pengamatan dan Pengukuran .....                                     | 41 |
| 4.3.1                      | Elevasi Muka Air.....   | 42 |
| 4.3.2                      | Waktu <i>Steady State Level</i> .....                               | 50 |
| 4.4                        | Analisis Data Hasil Pengukuran .....                                | 51 |
| 4.4.1                      | Variasi Diameter Pipa <i>Surge Tank</i> (d1 dan d2).....            | 51 |
| 4.4.2                      | Variasi Panjang Pipa <i>Penstock</i> (L1, L2, L3) .....             | 58 |
| 4.4.3                      | Hubungan Ketinggian Muka Air dengan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 61 |
| 4.4.4                      | Perhitungan Efek <i>Water Hammer</i> dan <i>Surge Tank</i> .....    | 74 |
| 4.5                        | Analisis Efektivitas <i>Surge Tank</i> Terhadap Variasi Model.....  | 83 |



|                           |                            |    |
|---------------------------|----------------------------|----|
| 4.6                       | Kendala Penelitian.....    | 84 |
| BAB V.....                |                            | 86 |
| KESIMPULAN DAN SARAN..... |                            | 87 |
| 5.1                       | Kesimpulan Penelitian..... | 87 |
| 5.2                       | Saran Penelitian.....      | 88 |
| DAFTAR PUSTAKA .....      |                            | 89 |
| LAMPIRAN.....             |                            | 93 |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

### BAB I

|  |   |
|--|---|
| Gambar 1. 1 Skema Sistem PLTA pada Bendungan ..... | 1 |
|--|---|

### BAB II

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2. 1 <i>Penstock - Ohakuri Dam New Zealand</i> .....               | 8  |
| Gambar 2. 2 Diameter dalam dan luar pipa .....                            | 9  |
| Gambar 2. 3 Hidrolika transien pada Posisi x Dalam Sistem Perpipaan ..... | 13 |
| Gambar 2. 4 Potongan secara memanjang sistem PLTA .....                   | 18 |
| Gambar 2. 5 Skema PLTA yang Dilengkapi <i>Surge Tank</i> .....            | 19 |
| Gambar 2. 6 Notasi Tinggi Muka Air pada <i>Surge Tank</i> .....           | 21 |
| Gambar 2. 7 Pemasangan Alat Ukur pada <i>Penstock</i> .....               | 23 |
| Gambar 2. 8 <i>Undamped Oscillation</i> pada <i>Pressure Tunnel</i> ..... | 24 |

### BAB III

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3. 1 Alat <i>Surge Tank</i> Lab .....                                    | 28 |
| Gambar 3. 2 Kontainer Tampungan <i>Inflow</i> pada Alat <i>Surge Tank</i> ..... | 28 |
| Gambar 3. 3 Kontainer Tampungan <i>Reservoir</i> .....                          | 29 |
| Gambar 3. 4 Alat Ukur Tinggi Muka Air pada <i>Surge Tank</i> .....              | 29 |
| Gambar 3. 5 Bagan Alir Penelitian .....   | 33 |

### BAB IV

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4. 1 Gambar Hubungan Tinggi Muka Air dengan Waktu Osilasi (sumber: <i>Water Hammer Analysis</i> , 2018) ..... | 17 |
| Gambar 4. 2 Alat <i>Surge Tank</i> Laboratorium (Sumber: hasil penelitian) .....                                     | 35 |
| Gambar 4. 3 Kontainer Tampungan 1 dan Tampungan 2 .....  | 36 |
| Gambar 4. 4 Saluran <i>Overflow</i> pada Kontainer 2 (sumber: hasil penelitian) .....                                | 36 |
| Gambar 4. 5 Gambar Alat Ukur Debit <i>Inflow</i> (sumber: hasil penelitian) .....                                    | 37 |
| Gambar 4. 6 Tinggi Tampungan <i>Reservoir</i> 22,5 cm .....  | 40 |
| Gambar 4. 7 Tinggi Tampungan <i>Reservoir</i> 28 cm .....  | 40 |
| Gambar 4. 8 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 1   | 42 |
| Gambar 4. 9 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 2<br>(Sumber: Perhitungan) .....              | 43 |
| Gambar 4. 10 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 3<br>(Sumber: Perhitungan) .....             | 44 |
| Gambar 4. 11 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 4<br>(Sumber: Perhitungan) .....             | 44 |
| Gambar 4. 12 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 5<br>(Sumber: Perhitungan) .....             | 45 |
| Gambar 4. 13 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 6<br>(Sumber: Perhitungan) .....             | 46 |
| Gambar 4. 14 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model A<br>(Sumber: Perhitungan) .....             | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 4. 15 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model B (Sumber: Perhitungan).....  | 47 |
| Gambar 4. 16 Siklus Tekanan Air pada Pipa Model C (Sumber: Perhitungan)....   | 48 |
| Gambar 4. 17 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model D (Sumber: Perhitungan).....  | 48 |
| Gambar 4. 18 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model E (Sumber: Perhitungan).....  | 49 |
| Gambar 4. 19 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model F (Sumber: Perhitungan).....  | 50 |
| Gambar 4. 20 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L1, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm) .....      | 52 |
| Gambar 4. 21 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L1, Tinggi Air Tampungan 28 cm) .....        | 53 |
| Gambar 4. 22 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L2, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm) .....      | 54 |
| Gambar 4. 23 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L2, Aliran Tinggi Air Tampungan 28 cm) ..... | 55 |
| Gambar 4. 24 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L3, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm) .....      | 56 |
| Gambar 4. 25 Perbandingan Pengaruh $d_1$ dan $d_2$ Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> (L3, Tinggi Air Tampungan 28 cm) .....        | 57 |
| Gambar 4. 26 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> ( $d_1$ , Tinggi Air Tampungan 22,5 cm) .....                | 58 |
| Gambar 4. 27 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> ( $d_1$ , Tinggi Air Tampungan 28 cm) .....                  | 59 |
| Gambar 4. 28 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> ( $d_2$ , Tinggi Air Tampungan 22,5 cm) .....                | 60 |
| Gambar 4. 29 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu <i>Steady State Level</i> ( $d_2$ , Tinggi Air Tampungan 28 cm) .....                  | 61 |
| Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan Elevasi Muka Air dan Waktu <i>Steady State</i> (Hasil Pengamatan, lihat Bab 4.2) .....                                       | 62 |
| Gambar 4. 31 Grafik Regresi Asimtot 1 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....  | 62 |
| Gambar 4. 32 Grafik Regresi Asimtot 2 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....  | 63 |
| Gambar 4. 33 Grafik Regresi Asimtot 3 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....  | 64 |
| Gambar 4. 34 Grafik Regresi Asimtot 4 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....  | 64 |
| Gambar 4. 35 Grafik Regresi Asimtot 5 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....  | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4. 36 Grafik Regresi Asimtot 6 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> .....       | 66 |
| Gambar 4. 37 Grafik Regresi Asimtot Model A Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 66 |
| Gambar 4. 38 Grafik Regresi Asimtot Model B Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 67 |
| Gambar 4. 39 Grafik Regresi Asimtot Model C Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 68 |
| Gambar 4. 40 Grafik Regresi Asimtot Model D Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 68 |
| Gambar 4. 41 Grafik Regresi Asimtot Model E Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 69 |
| Gambar 4. 42 Grafik Regresi Asimtot Model F Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu <i>Steady State</i> ..... | 70 |
| Gambar 4. 43 Grafik Siklus Tekanan Air pada Keadaan <i>underdamping</i> .....  | 71 |
| Gambar 4. 44 Grafik Hubungan $ht/H$ terhadap Waktu .....   | 73 |
| Gambar 4. 45 Grafik Hubungan $ht/H$ terhadap $t/t_{max}$ .....   | 74 |
| Gambar 4. 46 Model Reservoir dengan <i>Surge Tank</i> .....  | 80 |
| Gambar 4. 47 Grafik Perbandingan Amplitudo Osilasi Teoritis dengan Hasil Observasi.....                                | 83 |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 4. 1 Perhitungan Debit <i>Outflow</i> Model .....                                     | 38 |
| Tabel 4. 2 Variasi Diameter Pipa <i>Surge Tank</i> .....                                    | 38 |
| Tabel 4. 3 Variasi Panjang Pipa <i>Penstock</i> .....                                       | 39 |
| Tabel 4. 4 Variasi Model Alat <i>Surge Tank</i> .....                                       | 41 |
| Tabel 4. 5 Tabel Hasil Pengamatan Waktu <i>Steady State Level</i> .....                     | 51 |
| Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai Konstanta (Sumber: Hasil Perhitungan) .....                   | 72 |
| Tabel 4. 7 Tekanan Air di Dalam Pipa dan <i>Safety Factor</i> Material.....                 | 76 |
| Tabel 4. 8 Waktu Gelombang <i>Water Hammer</i> pada Variasi L1, L2, L3 .....                | 77 |
| Tabel 4. 9 Kehilangan Energi Akibat Gaya Gesek pada Pipa <i>Penstock</i> .....              | 79 |
| Tabel 4. 10 Perhitungan Teoritis Alat <i>Surge Tank</i> .....                               | 82 |
| Tabel 4. 11 Ketinggian Muka Air Maksimum dan Waktu <i>Steady State</i> Setiap Variasi ..... | 84 |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



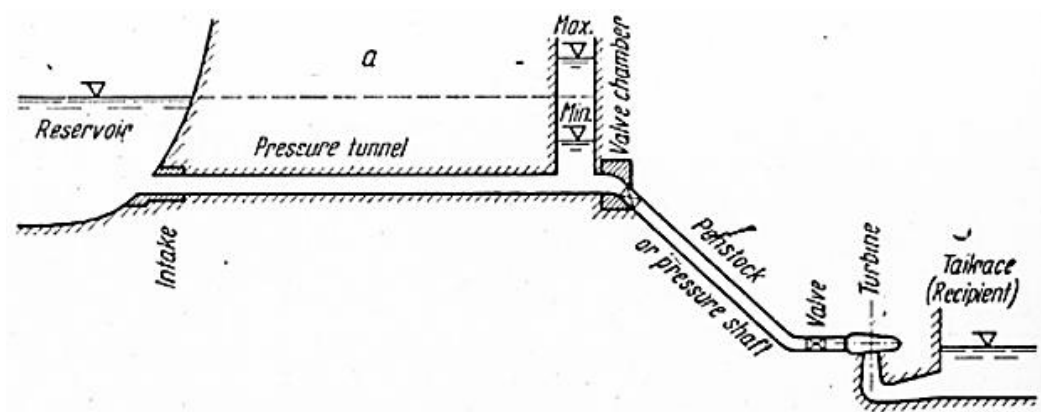
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Fasilitas bendungan yang dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air dilengkapi dengan saluran pipa tertutup berupa *pressure tunnel* dan pipa *penstock* yang menyambungkan *reservoir* dengan *power house* (Gambar 1.1). Di dalam pipa *penstock*, terdapat turbin yang berfungsi untuk mengendalikan dinamo dan harus berputar dengan kecepatan tertentu. Kecepatan aliran air dalam pipa sangat penting untuk memastikan frekuensi putaran turbin yang konstan. Dalam keadaan tersebut, aliran air bergerak menuju turbin melalui saluran pipa panjang tertutup.

Terdapat massa air dalam jumlah besar di dalam saluran pipa dan diperlukan pengaturan gaya untuk memperlambat atau mempercepat massa aliran ketika kebutuhan air untuk memutar turbin berubah. Variasi aliran yang menuju ke turbin untuk mempertahankan kecepatana aliran yang konstan akan menghasilkan tekanan di dalam seluruh saluran pipa tertutup.



Gambar 1. 1 Skema Sistem PLTA pada Bendungan

(sumber: [www.youngeng.com](http://www.youngeng.com) – *Engineering*, 2013)

Dalam keadaan operasional yang normal, pengaturan turbin dilakukan dengan perubahan secara bertahap dan lambat. Namun, dalam setiap sistem *power transmission*, kejadian seperti kegagalan pada sistem *power cable*, arus pendek (*short circuit*), dan kegagalan pada sambungan stasiun yang terhubung ke jaringan

listrik yang sama, akan menyebabkan penurunan atau kecepatan aliran pada *penstock* secara tiba-tiba.

Pada saat kondisi tidak ada air di dalam pipa (*load rejection*), penyediaan air harus dilakukan dengan cara menambah aliran air secara perlahan oleh katup yang beroperasi secara otomatis. Namun, ketika ada beban aliran yang meningkat secara tiba-tiba, massa air di dalam pipa akan bergerak dengan sangat cepat dan bertekanan tinggi. Hal ini dapat menimbulkan efek *water hammer*.

*Water hammer* adalah fenomena yang terjadi pada saluran pipa tertutup ketika kecepatan alir fluida berkurang akibat penutupan katup secara tiba-tiba.

Saat katup terbuka, aliran air normal terjadi sepanjang *pressure tunnel* (lihat Gambar 1.1), namun ketika katup tertutup secara cepat aliran air akan tertekan dan menyebabkan kenaikan tekanan air yang sangat tinggi. Dengan kata lain, energi kinetik aliran akan berubah menjadi energi tegang dari air dan pipa. Proses ini akan berlangsung dan membawa tekanan berbalik arah dari *downstream* ke *upstream pressure tunnel* dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan awal.

Ketika tekanan gelombang mencapai titik awal *upstream* (hulu *pressure tunnel*), aliran pada pipa akan mencapai keadaan tekanan berlebih. Saat katup turbin pada *penstock* ditutup secara tiba-tiba, dimensi pipa *penstock* yang sangat panjang akan menambah tekanan dan efek *water hammer* yang sangat besar. Oleh karena itu, pipa *penstock* harus didesain agar dapat menahan peningkatan tekanan dari efek *water hammer*. Hal yang dapat memengaruhi *water hammer* adalah profil pipa, panjang pipa, momen inersia, material pipa, dimensi pipa, dan jenis zat cair yang terkandung dalam pipa. Dalam kasus pipa *penstock* yang berdimensi sangat panjang, penambahan perkuatan sepanjang pipa akan memerlukan biaya yang sangat besar. Selain itu, setiap pemutaran turbin akan dimulai, waktu yang diperlukan oleh aliran untuk mencapai turbin akan sangat lama. Dengan demikian, perlu dilakukan pengurangan panjang pipa dengan mempertimbangkan efek *water hammer* dan waktu sampainya aliran ke turbin. Oleh karena itu, diperlukan penyediaan bangunan *surge tank*.

Fungsi dari *surge tank* adalah sebagai berikut:

- 1) Menyediakan tempat tampungan sementara (*reservoir* pada pipa *penstock*). Hal ini akan mengurangi waktu yang dibutuhkan aliran air untuk sampai ke turbin dan membatasi panjang pipa yang terkena efek *water hammer*.
- 2) Menyediakan air tambahan yang dibutuhkan turbin selama penyaluran air sampai kecepatan pipa terpenuhi dan aliran mencapai *steady state level*.
- 3) Menyeimbangkan ketinggian muka air yang diakibatkan oleh osilasi massa dan merubah fluktuasi muka air menjadi kecil dengan waktu yang singkat.

### **1.2 Rumusan Masalah**

Ukuran dari variasi panjang pipa *penstock* dan diameter pipa *surge tank* sangat berpengaruh dalam mereduksi efek *water hammer* setelah penutupan katup. Untuk mendapatkan desain *surge tank* yang paling efektif, berikut adalah beberapa rumusan masalah yang perlu diselesaikan.

1. Apa hubungan antara variasi diameter pipa *surge tank* dengan elevasi muka air maksimum pada *surge tank*?
2. Apa hubungan antara variasi panjang pipa *penstock* dengan elevasi muka air maksimum pada *surge tank*?
3. Apa hubungan antara elevasi muka air pada *surge tank* dengan waktu *steady state flow*?
4. Model *surge tank* manakah yang menunjukkan hasil paling efektif dalam mencapai *steady state flow*?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengetahui hubungan variasi diameter pipa *surge tank* dengan elevasi muka air maksimum pada *surge tank*.
2. Mengetahui hubungan antara panjang pipa *penstock* dengan elevasi muka air maksimum pada *surge tank*.
3. Mengetahui hubungan antara elevasi muka air pada *surge tank* dengan waktu *steady state flow*.

4. Menentukan model *surge tank* yang menunjukkan hasil paling efektif dalam mencapai *steady state flow*.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Melalui penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mendapatkan desain *Surge Tank* yang paling efektif dalam menstabilkan tinggi muka air pada pipa.
2. Menghadirkan solusi dari *pipe failure* yang sering terjadi pada sistem perpipaan (*surge tank* pada PLTA bendungan).

#### **1.5 Batasan Masalah**

Dalam penelitian model eksperimental ini, diberikan batasan-batasan masalah seperti berikut:

1. Alat *Surge Tank* yang digunakan sebagai objek penelitian tersedia di Laboratorium Hidrolika dan Pantai Departemen Teknik Sipil - ITS dan tidak mewakili keadaan eksisting di lokasi studi.
2. Gaya gesek pada pipa dan perubahan kecepatan akibat profil pipa diabaikan.
3. Pengukuran variasi debit tidak menggunakan alat penghitung debit (pengukuran dilakukan secara manual).

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### *2.1 Science of Oversight*

Pengembangan penelitian tentang *Surge Tank* akibat efek dari *water hammer* telah banyak dilakukan.

Atil Bulu (2012) melakukan penelitian tentang variasi tipe *surge tank* berdasarkan desain hidrolika dan mengembangkan dengan merubah dimensi dan material dari saluran. Dalam bukunya yang berjudul '*Hydroelectric Power Plants*', gagasan mengenai *surge tank* diterapkan sebagai bangunan pelengkap sistem PLTA bendungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan model *surge tank* yang memiliki kondisi stabilitas paling baik untuk menahan efek *water hammer*. Cara yang dilakukan adalah dengan mendemonstrasi angka *safety factor* pada setiap model *surge tank*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa angka stabilitas yang paling baik dihasilkan oleh *surge tank* dengan desain *throttled*.

Ermal Daka (2015) dalam penelitian berjudul '*Analysis of a Hydraulic Surge Tank Model*' melakukan penelitian dengan perbandingan model alat dan rumus teoritis. Perhitungan mengenai fenomena *water hammer* diadaptasi dari perilaku hidrolika teknik penyediaan air pada PLTA. Digunakan program bantu *TUG Hammer* dalam melakukan perhitungan dan model laboratorium untuk mengamati fenomena *water hammer*. Dari perbandingan hasil data dan teoritis didapatkan angka tinggi tekanan pada *surge tank* dan tekanan pada *pressure tunnel* atau pipa *penstock*. Hasil dari permodelan laboratorium menunjukkan angka yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil menggunakan perhitungan rumus.

Daniel Gomsrud (2015) melakukan penelitian tentang *throttle* pada *surge tank* oleh dilakukan dengan memasang katup berbentuk kerucut pada *inlet surge tank*. Latar belakang dilakukan penelitian ini adalah amplitudo yang sangat tinggi dari osilasi massa di Tonstad *surge tank* menyebabkan kesulitan untuk mengoperasikan sistem PLTA. Dalam bukunya yang berjudul '*Design of a Surge Tank Throttle for Tonstad Hydropower Plant*', dilakukan perhitungan dan penelitian fenomena *water hammer* di dalam pipa bertekanan tinggi pada *hydropower plant*. Perhitungan untuk mengevaluasi efek dari penambahan *throttle*

pada *surge tank* menggunakan model numerik satu dimensi dengan menggunakan program bantu LVTrans. Optimalisasi dilakukan pada desain *throttle* dengan simulasi perbandingan beberapa *throttle* untuk perbandingan angka reduksi dari setiap variasi model *throttle*. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah model *throttle* asimetrik yang dapat mereduksi tinggi muka air pada pipa *surge tank* sampai dengan 9,6 meter.

Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Nicolas J Adam (2016) dituangkan dalam buku berjudul '*Characterisation of Hydraulic Behavior of Surge Tanks Orifices*'. Tujuan dari penelitiannya adalah untuk mengoptimalkan desain *surge tank orifices* agar dapat diimplementasikan pada sistem perpipaan. Hasil dari penelitian ini adalah bahwa lokasi peletakkan katup peredam energi (*throttle*) berguna untuk mengatur tinggi muka air yang terjadi selama osilasi massa. *Throttle* yang diletakkan diantara *surge tank* dan badan bendungan ini dapat menghemat harga konstruksi (dibandingkan dengan penggunaan pipa *penstock* yang panjang) dan dapat mereduksi tekanan akibat debit air yang tiba-tiba meningkat.

Parameter lain yang menentukan peredaman energi pada *surge tank* ditemukan oleh Robert Stigen (2015) yang meneliti tentang desain *throttle*. Penelitian yang berjudul '*Physical Modelling of Surge Tank Throttling*' membahas tentang simulasi numerik yang dibandingkan dengan model fisik *surge tank*. Hasil dari penelitian ini menemukan bahwa tekanan dari osilasi massa dapat berkurang sebanyak 5,2% dengan pemasangan *throttle* pada model fisik. Selain itu, diungkapkan bahwa setiap sistem pengoperasian PLTA memerlukan desain *throttle* yang berbeda sesuai dengan letak geografisnya.

Penelitian tentang *surge tank* untuk mengontrol efek *water hammer* ini dilakukan dengan membandingkan rumus teoritis *surge tank* dengan model fisik alat *surge tank*. Rumus teoritis akan digunakan untuk dasar perhitungan perilaku hidrolika *surge tank* dan *water hammer*. Model alat *surge tank* akan diamati dengan menggunakan alat ukur untuk mengetahui tinggi muka air, waktu fluktuasi selama terjadi osilasi massa, dan debit aliran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis *surge tank* saat terjadi fenomena *water hammer* dan tekanan pada *pressure tunnel* (Anindita, 2018).

## 2.2 Pipa Bertekanan Tinggi (*Pressure Pipelines*)

Konsep dari *pressure pipelines* adalah untuk menghubungkan bendungan dengan *surge tank* dan *power station* dengan jarak yang paling pendek. Sambungan tersebut dibagi menjadi dua bagian, yaitu saluran pipa dari bendungan – *surge tank* dan dari *surge tank* – *power station*.

*Pressure pipelines* harus sesuai dengan keadaan topografi. Sistem PLTA pada bendungan biasanya diletakkan pada daerah dengan ketinggian ekstrim. Perbandingan antara ketinggian ini yang menyebabkan dibutuhkan *surge tanks* pada bagian sambungan hilir PLTA.

Pipa bertekanan tinggi pada umumnya terdapat di bawah tanah pada bagian sistem PLTA, pipa jenis ini disebut *pressure tunnel*. Struktur saluran pipa akan lebih aman dengan bantuan tekanan dari batuan di dalam tanah karena dapat membantu menahan tekanan aliran air di dalam pipa. *High pressure tunnels* umumnya terbuat dari material baja yang dilapisi dengan beton agar dapat menahan tekanan air yang tinggi. Solusi ini terbukti sangat aman, namun dibutuhkan biaya yang maksimal untuk pembangunannya. Oleh karena itu, biasanya akan ada kombinasi material perpipaan dengan panjang tertentu akan dibuat saluran dari baja dan beton, sedangkan lainnya adalah dengan *grouting* dan semen mortar (Mosonyi, 1960).

### 2.2.1 *Penstock*

*Penstock* adalah pipa bertekanan tinggi yang terletak antara turbin dengan *surge tank* atau *reservoir*. Struktur *penstock* harus bersifat efisien dan aman secara hidrolika. Material *penstock* pada umumnya adalah baja, karena dinilai aman dan kuat untuk menghindari *pipe failure*.

Kehilangan energi pada *penstock* mengurangi kecepatan dan debit aliran air, diantaranya yaitu *trash rack losses*, kehilangan energi saat masuknya air, gesekan pada pipa, perubahan profil atau sambungan pipa, dan perubahan struktur saat memasuki katup (Reclamation, 1977).

Berikut adalah contoh gambar *penstock*.



Gambar 2. 1 *Penstock - Ohakuri Dam New Zealand*

(sumber: <http://en.wikipedia.org/wiki/Penstock>, 2018)

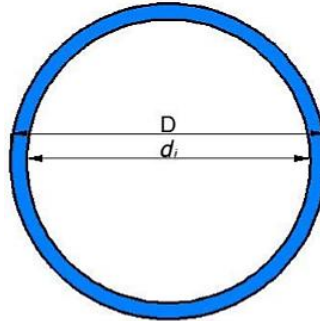
Pipa *penstock* yang terkubur di dalam tanah umumnya sedalam 1 atau 1,2 meter untuk melindungi pipa. Kelebihan dari pipa yang terkubur dalam tanah adalah:

- a) Tanah melindungi pipa dari efek variasi temperatur.
- b) Tidak menghalangi aset atau bangunan yang ada di atas lahan.
- c) Tidak terpengaruh longsor, banjir, dan gangguan lain.
- d) Menambah efek redaman energi saat ada pergerakan aliran yang kuat di dalam pipa.

Distribusi aliran dan tekanan sepanjang pipa dipengaruhi oleh profil dan ukuran pipa. Perubahan satu diameter pipa akan mempengaruhi tekanan aliran sepanjang pipa (R.E. Featherstone, C. Nalluri, 2001). Menentukan dimensi dari pipa dapat dilakukan dengan menghitung diameter pipa bagian dalam dan ketebalan pipa. Ketebalan pipa ditentukan berdasarkan angka tekanan aliran. Sedangkan, diameter pipa ditentukan berdasarkan kehilangan tekanan atau kecepatan aliran yang diizinkan.



- Menentukan dimensi berdasarkan kecepatan aliran



Gambar 2. 2 Diameter dalam dan luar pipa

(sumber: Idelchik, 2005)

Ketika menentukan dimensi dengan mempertimbangkan kecepatan aliran, diameter bagian dalam pipa dihitung dengan rumus berikut:

Rumus diameter luar pipa:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \times v}} \quad (2.1)$$

Rumus debit aliran pada pipa:

$$Q = v \times A = v \times \frac{\pi \times di^2}{4} \quad (2.2)$$

Keterangan:

|    |   |
|----|---|
| D  | : diameter luar pipa (m)                |
| di | : diameter dalam pipa (m)               |
| Q  | : debit (m <sup>3</sup> /s)             |
| v  | : kecepatan aliran (m/s)                |
| A  | : luas area melintang (m <sup>2</sup> ) |

### 2.2.2 *Local Losses* atau *Minor Losses*

Kehilangan energi yang diakibatkan oleh perubahan kecepatan secara tiba-tiba disebut dengan *local losses*.

$$h_{\xi} : \xi \times \frac{v^2}{2g} \quad (2.3)$$

Keterangan:

|           |   |
|-----------|---|
| $h_{\xi}$ | : tinggi kehilangan energi (m)            |
| $\xi$     | : faktor <i>local losses</i>              |
| $v$       | : kecepatan aliran (m/s)                  |
| $g$       | : percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ ) |

Persamaan tersebut juga dapat digunakan untuk menghitung kehilangan energi yang terjadi saat aliran air dari *reservoir* memasuki pipa (*Loss at entrance*), penutupan katup (*valve*), dan saat perubahan profil pipa (Horace.W.King, 1996).

### 2.2.3 Hidrolika Aliran Air pada Pipa

Aliran air pada pipa terbagi menjadi:

- Laminar atau Turbulen

Dalam aliran laminar, fluida berpindah secara lapisan paralel tanpa ada lintasan arus. Untuk pipa berbentuk silinder, lapisan akan mengikuti bentuk menjadi silinder.

Aliran turbulen dikategorikan sebagai aliran yang memiliki kecepatan lintas arus. Salah satu hasil dari aliran turbulen adalah terbentuknya distribusi aliran kecepatan seragam dalam semua bagian.

Hal yang membedakan aliran laminar dan turbulen adalah kehilangan energi yang lebih besar terjadi pada aliran turbulen. Kriteria yang membedakan antara aliran laminar dengan aliran turbulen dikembangkan oleh Reynolds (1883) berupa bilangan Reynolds ( $Re$ ).

$$Re = \frac{d \rho v}{\mu} \quad (2.4)$$

Keterangan:

|        |  |
|--------|--|
| $Re$   | : bilangan Reynolds                    |
| $d$    | : diameter pipa (m)                    |
| $\rho$ | : massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )  |
| $v$    | : kecepatan aliran (m/s)               |
| $\mu$  | : viskositas ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) |

Untuk aliran di dalam pipa, aliran laminar terjadi ketika bilangan  $Re \leq 2300$  dan untuk aliran turbulen  $Re \geq 4000$ . Jika angka  $Re$  berada di antara 2300 – 4000, maka aliran tersebut termasuk aliran transisi (Horace.W.King, 1996).

Pada aliran laminar, digunakan persamaan Hagen- Poiseulle seperti berikut:

$$f = \frac{64\mu}{VD\rho} = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

Keterangan:

- $f$  : koefisien gesek  
 $\mu$  : viskositas (m<sup>2</sup>/s)  
 $\rho$  : massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)  
 $Re$  : bilangan Reynolds

Pada aliran turbulen, persamaan koefisien gesek yang didapat berasal dari persamaan empiris Blassius:

$$f : 0,316 \times Re^{-0,25} \quad (2.6)$$

Rumus empiris untuk *friction loss* juga dapat dihitung dengan persamaan Darcy – Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

Keterangan:

- $h_f$  : tinggi *friction loss* (m)  
 $\lambda$  : koefisien gesekan  
 $L$  : panjang pipa (m)  
 $D$  : diameter pipa (m)  
 $v$  : kecepatan aliran (m/s)  
 $g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

### 2.3 Fenomena *Water Hammer*

Pada kasus ketika terjadi perubahan kecepatan di dalam sistem perpipaan, fluktuasi tekanan juga terjadi. Jika ada hambatan pada kecepatan aliran, maka energi kinetik akan berubah menjadi energi tekanan dan hal ini yang disebut dengan *water hammer* (Giesek, 1990). Oleh karena itu, fenomena *water hammer* adalah hasil dari gaya yang melawan massa inersia dari air dan merubah arah alirannya.

*Water hammer* terjadi sebagai efek dari pengoperasian katup di dalam pipa. Proses dari fenomena ini dapat disebabkan oleh masalah yang terjadi pada turbin, atau ketika debit aliran dalam pipa memiliki kecepatan yang tinggi dan katup tidak dapat menahan gayanya.

Penutupan secara tiba-tiba pada sistem PLTA di bagian mekanisme penutupan terminal, pintu air, atau katup turbin, diikuti dengan efek inersia yang menghasilkan tekanan dan pembengkokkan pada pipa *penstock*. Air yang mengalir dengan kecepatan ( $v$ ) pada *penstock* mengalami penurunan kecepatan saat katup ditutup dan gaya inersia dari penurunan massa adalah sebagai berikut:

$$P = - M \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Keterangan:

$M$  : massa air ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Delta v$  : perbedaan kecepatan ( $\text{m/s}^2$ )

$\Delta t$  : perbedaan waktu (s)

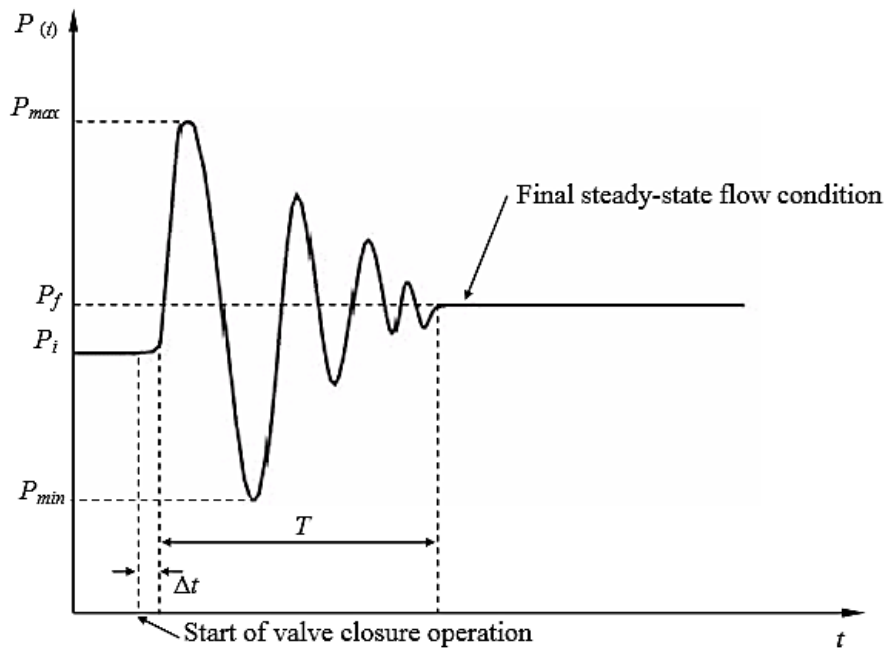
Dari formula di atas, dapat diketahui bahwa massa air akan mengalami penurunan oleh  $\Delta v$  selama waktu  $\Delta t$ .

### 2.3.1 *Unsteady Flow atau Transient Flow*

Dalam sistem distribusi air, sistem kontrol aliran termasuk dalam bagian pengoperasian nya, berupa pembukaan atau penutupan katup dan pengoperasian pompa. Ketika kegiatan tersebut terjadi secara cepat atau tiba-tiba, maka dapat menyebabkan fenomena hidrolika aliran tidak tetap. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan sistem atau bahkan kegagalan sistem jika aliran tidak tetap tersebut tidak diminimalisir.

Ketika kondisi muka air stabil (*steady state level*) dari aliran pada sistem telah tercapai, nilai kondisi aliran awal (*initial flow*) sistem, dikelompokkan menjadi: kecepatan ( $V$ ) dan tekanan ( $P$ ) pada posisi sepanjang pipa ( $x$ ), berubah selama waktu ( $t$ ) sampai kondisi aliran akhir yang mencapai kondisi keseimbangan (*steady state condition*).

Pada Gambar di bawah, fenomena yang terjadi selama interval  $T$ , diantara kondisi awal dan kondisi setimbang (*steady state condition*) diketahui sebagai hidrolika transien. Perhitungan hidrolika transien dilakukan dengan menggunakan hasil dari fungsi  $V(x,t)$  dan  $P(x,t)$  selama interval waktu  $T$  yang dihasilkan dari kontrol aliran operasional dengan jangka waktu  $\Delta t$ .



Gambar 2. 3 Hidrolika transien pada Posisi x Dalam Sistem Perpipaan

(sumber: *Hydraulic Transient in a Pipeline*, 2007)

Gambar di atas menunjukkan bagaimana perubahan dari *transient flow* pada sistem perpipaan saat katup ditutup secara cepat. Dalam grafik tersebut, tekanan ( $P$ ) adalah sebagai fungsi waktu ( $t$ ) yang dihasilkan dari pengoperasian katup.  $P_i$  adalah tekanan awal saat dimulainya aliran transien,  $P_f$  adalah tekanan akhir,  $P_{min}$  adalah tekanan minimum yang dihasilkan, dan  $P_{max}$  adalah tekanan transien maksimum.

Perubahan dari aliran *steady flow* ke *unsteady flow* pada sistem perpipaan terjadi karena adanya perubahan pada kondisi batas. Beberapa kondisi batasan yaitu:

- Perubahan pada pengaturan katup, secara otomatis atau tidak sengaja
- Pengaktifan atau penghentian pompa
- Perubahan kebutuhan gaya untuk memutar turbin
- Kegiatan menukar daya pompa
- Perubahan ketinggian dari *reservoir*

Selain merusak peralatan yang terdapat di sekitar sistem perpipaan, *water hammer* dapat mengakibatkan kegagalan pipa (*pipe failure*) oleh tekanan yang tinggi. Fenomena seperti *column separation* dapat terjadi di dalam sistem perpipaan

ketika kondisi batas terjadi dan terjadi pengurangan tekanan pada ujung pipa. Pengurangan tekanan mengakibatkan gelombang dengan arah sebaliknya akan diteruskan sepanjang pipa dan kecepatan aliran akan berkurang sampai aliran mencapai kecepatan stabil (Bergant, 2005).

### 2.3.2 Perhitungan *Water Hammer* Menggunakan Formula Joukowsky (*Joukowsky Equation*)

Persamaan Joukowsky didapatkan dari hasil eksperimen fenomena *water hammer* pada perpipaan yang diakibatkan penutupan katup (*valve*) secara cepat. Saat katup ditutup, aliran akan berbalikarah dan menyebabkan penurunan kecepatan di dalam pipa. Tekanan yang tinggi akan dihasilkan dan menyebabkan *Hydraulic Shock*. Proses ini dinamakan *Joukowsky pressure*. Persamaan Joukowsky menggunakan tanda negatif tergantung pada tekanan gelombang yang menuju hulu atau hilir pada fenomena *water hammer*.

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot \Delta v \quad (2.9)$$

Keterangan:

- $\rho$  : massa jenis cairan ( $\text{kg/m}^3$ )
- $c$  : seleritas gelombang ( $\text{m/s}$ )
- $\Delta v$  : perubahan kecepatan ( $\text{m/s}$ )

Persamaan  $\Delta p$  untuk *water hammer* digunakan untuk fluida dari hulu katup dan tidak memperhitungkan efek yang mempengaruhi aliran pada hilir katup.

Persamaan untuk menghitung seleritas gelombang ( $c$ ) selama *water hammer* didasarkan dari konservasi massa dan menyebabkan dinding material pipa melendut (Wylie, 1993). Berikut adalah untuk menghitung angka seleritas gelombang:

$$c = \sqrt{\frac{Ev}{\rho}} \quad (2.10)$$

Keterangan:

- $c$  : seleritas gelombang ( $\text{m/s}$ )
- $Ev$  : modulus elastisitas fluida ( $\text{N/m}^2$ )
- $\rho$  : massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

### 2.3.3 Gelombang Percepatan *Water Hammer*

Penutupan katup secara tiba-tiba yang dapat menyebabkan fenomena *water hammer* disebabkan oleh katup yang ditutup secara lebih cepat dibandingkan dengan *wave travel time* (Hwang and Houghtalen, 1996). Pada *water hammer*, waktu gelombang ( $t_w$ ) adalah waktu gelombang bertekanan untuk sampai ke katup turbin, berbalik ke sumber air (*reservoir*) dan kembali ke arah katup turbin. Formula dari waktu gelombang adalah:

$$t_w : \frac{2L}{c} \quad (2.11)$$

Keterangan:

|       |                             |
|-------|-----------------------------|
| $t_w$ | : waktu gelombang (s)       |
| $L$   | : panjang pipa (m)          |
| $c$   | : seleritas gelombang (m/s) |

### 2.3.4 Variabel yang Mempengaruhi *Water Hammer* dan Persamaan Gelombang

Berikut adalah beberapa variabel yang dapat mempengaruhi dan menyebabkan fenomena *water hammer*:

(Dimensi:  $F = \text{Force}$ ,  $L = \text{Length}$ ,  $M = \text{Mass}$ ,  $T = \text{Time}$ )

|            |   |
|------------|---|
| $c$        | : seleritas gelombang [ $L/T$ ]   |
| $D$        | : diameter bagian dalam pipa [ $L$ ]  |
| $E$        | : modulus elastisitas material komposit [ $L/T^2$ ]   |
| $E_f$      | : modulus elastisitas cairan [ $F/L^2$ ]  |
| $E_p$      | : modulus elastisitas material pipa [ $F/L^2$ ]   |
| $L$        | : panjang pipa [ $L$ ]  |
| $t_w$      | : wave travel time [ $T$ ]  |
| $w$        | : ketebalan dinding pipa [ $L$ ]  |
| $\Delta p$ | : kenaikan tekanan maksimal pada pipa yang menyebabkan efek <i>water hammer</i> akibat penutupan katup secara cepat [ $F/L^2$ ] |
| $\Delta V$ | : perubahan kecepatan pada <i>water hammer</i> [ $L/T$ ]  |
| $\rho$     | : massa jenis fluida [ $M/L^3$ ]  |

Berikut adalah perhitungan Persamaan Momentum:

$$\Sigma F = \rho Q (V_2 - V_1) \quad (2.12)$$

Keterangan:

F = gaya (kg.m/s<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

Q = debit air (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>1</sub> = kecepatan awal fluida (m<sup>2</sup>/s)

V<sub>2</sub> = kecepatan akhir fluida (m<sup>2</sup>/s)

Kecepatan gelombang, atau biasa disebut dengan seleritas, adalah fungsi teoritis dari seleritas gelombang. Rumus Cruise untuk *theoretical wave celerity* adalah:

$$c' = \sqrt{\frac{Ev}{\rho}} \quad (2.13)$$

Keterangan:

c' = *theoretical wave celerity* (m/s)

Ev = modulus elastisitas fluida (air = 2,24 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

Kecepatan gelombang adalah fungsi komposit dari modulus elastisitas dari pipa, sistem perpipaan, diameter pipa, dan ketebalan dinding pipa. Setelah menghitung *theoretical wave celerity*, dihitung angka seleritas tekanan gelombang. Persamaan digunakan untuk menghitung kecepatan tekanan gelombang yang terjadi di dalam pipa.

$$c = \sqrt{\frac{c'^2}{1 + \left(\frac{Ev \times d}{\epsilon \times Ep}\right)}} \quad (2.14)$$

Keterangan:

c = seleritas tekanan gelombang (m/s)

c' = *theoretical wave celerity* (m/s)

Ev = modulus elastisitas fluida (air = 2,24 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>)

d = diameter pipa (m)

$\epsilon$  = ketebalan dinding pipa (m)

Ep = modulus elastisitas pipa (plastik = 5 x 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>)



Perubahan tekanan maksimum yang dihasilkan oleh efek *water hammer* pada pipa ditentukan oleh persamaan momentum. Persamaan (6) adalah untuk penutupan katup secara cepat, dengan syarat ketika waktu penutupan katup kurang dari panjang pipa dibagi dengan percepatan gelombang ( $c$ )  $t < \frac{L}{c}$ .

$$\Delta p = \rho c V_0 \quad (2.15)$$

Keterangan:

$\Delta p$  = perubahan tekanan ( $\text{N/m}^2$ )

$\rho$  = massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$  = seleritas tekanan gelombang ( $\text{m/s}$ )

$V_0$  = kecepatan awal fluida ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Tekanan maksimal yang akan terjadi di pipa adalah tekanan awal yang terjadi ketika pipa mulai dialiri air ditambah dengan perubahan tekanan ketika katup ditutup. Berikut adalah perumusan untuk tekanan maksimal yang terjadi di pipa:

$$p_{(max)} = p_0 + \Delta p \quad (2.16)$$

Keterangan:

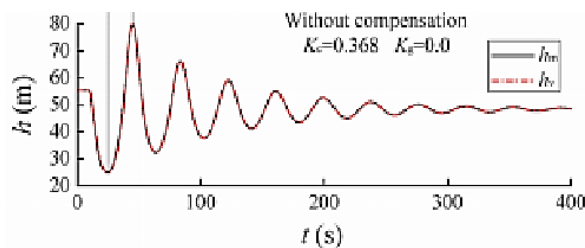
$p_{(max)}$  = tekanan maksimal ( $\text{N/m}^2$ )

$p_0$  = tekanan awal ( $\text{N/m}^2$ )

$\Delta p$  = perubahan tekanan ( $\text{N/m}^2$ )

Variasi tekanan yang terjadi pada pipa saat *water hammer* terjadi akan menciptakan fluktuasi tinggi muka air pada pipa *surge tank* dalam waktu tertentu, yaitu  $t = \frac{2L}{c}$ . Setelah beberapa saat, tekanan air akan menurun akibat gaya friksi.

Gambar berikut adalah contoh siklus perubahan tekanan air dalam pipa.



Gambar 4. 1 Gambar Hubungan Tinggi Muka Air dengan Waktu Osilasi (sumber: *Water Hammer Analysis*, 2018)

Dalam gambar di atas, tekanan dan kecepatan dari air dalam pipa mengalami osilasi massa (fluktuasi), sedangkan keseimbangan muka air (steady state level) akan terus menurun dalam periode tertentu.

Untuk penutupan katup dalam pipa dengan keadaan  $t > \frac{L}{c}$ , perubahan tekanan dapat dihitung dengan rumus Cruise Persamaan (6).

$$\Delta p = p_0 \left( \frac{N}{2} + \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right) \quad (2.17)$$

Keterangan:

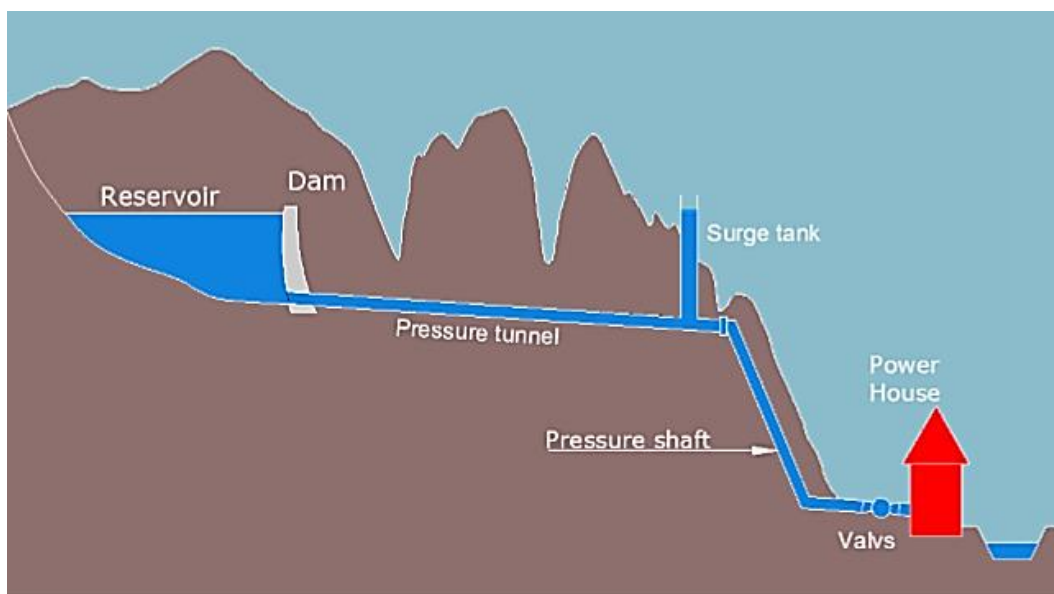
$\Delta p$  = perubahan tekanan (N/m<sup>2</sup>)

$p_0$  = tekanan awal (N/m<sup>2</sup>)

$N = \frac{\rho \cdot L \cdot V_0}{p_0 \cdot T_v}$  {L = panjang pipa (m),  $T_v$  = waktu penutupan (s)}

## 2.4 Surge Tank

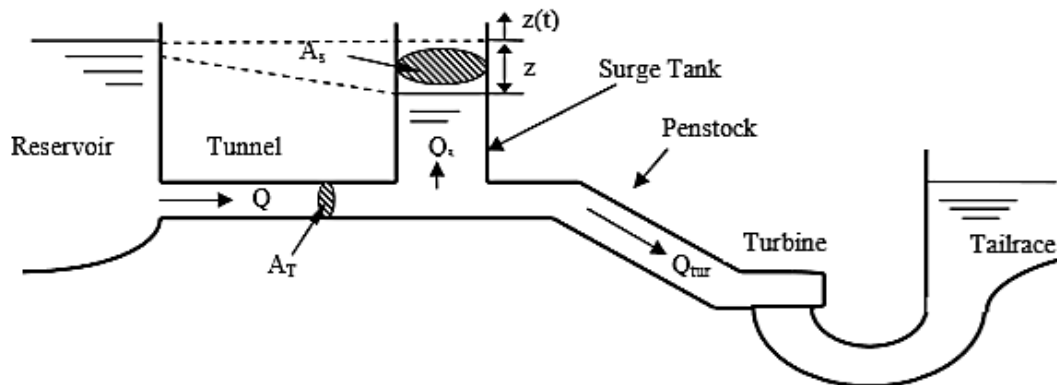
Berikut adalah skema cara kerja *surge tank*.



Gambar 2. 4 Potongan secara memanjang sistem PLTA

(sumber: *Analysis of Hydropower Plant*, 2015)

Bangunan *surge tank* diletakkan diantara *pressure tunnel* dan *penstock* (*pressure shaft*). Bangunan ini berupa pipa memanjang secara vertikal dan terbuka pada bagian atasnya. Tinggi muka air pada pipa *surge tank* mewakili tinggi muka air pada *reservoir*. Gambar 2.6 di bawah ini menunjukkan skema PLTA yang dilengkapi oleh *surge tank* secara lebih jelas.



Gambar 2. 5 Skema PLTA yang Dilengkapi *Surge Tank*

(sumber: <https://www.researchgate.net/publication/313242728> , 2013)

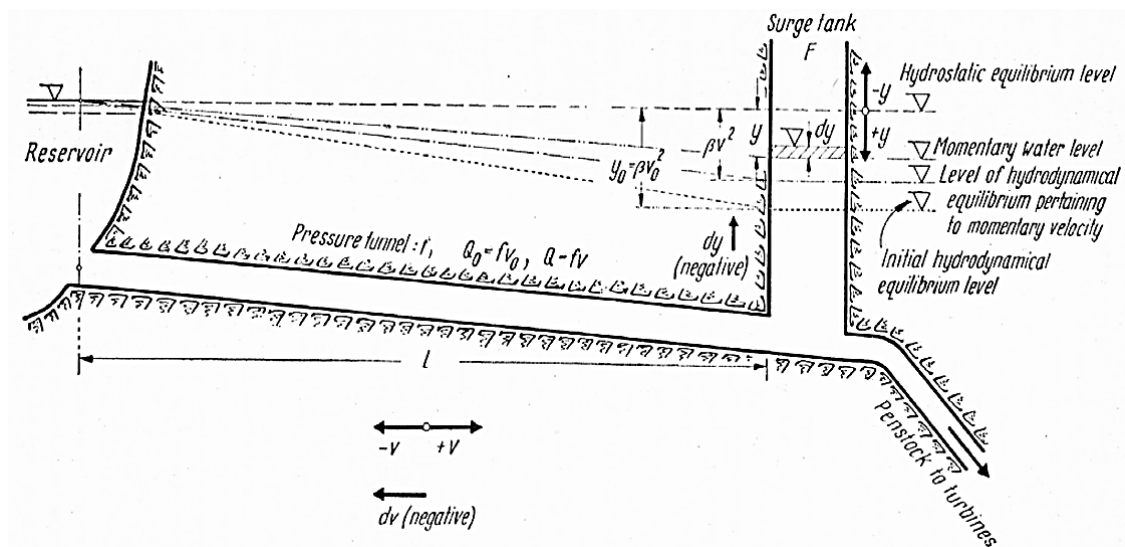
Saat terjadi penutupan katup turbin secara tiba-tiba, massa air yang mengalir pada *pressure tunnel* dan pipa *penstock* masih mengandung energi kinetik kondisi awal. Pada *pressure tunnel*, energi kinetik akan menjadi *inflow* yang mengarah ke *surge tank*. Sedangkan, energi kinetik pada *penstock* akan berubah menjadi energi tekanan, fenomena ini disebut dengan *water hammer*. Kekuatan dari efek *water hammer* ini tergantung pada dimensi pipa dan modulus elastisitas material pipa. Dalam kasus ini, fungsi *surge tank* digunakan sebagai pengontrol tekanan yang datang dari *penstock* dan mengurangi tekanan yang dapat merusak *pressure tunnel*. Fungsi lain dari *surge tank* adalah untuk menyediakan suplai air pada turbin saat akan diaktifkan. Ketika katup turbin tiba-tiba dibuka dan aliran air dari *penstock* mengalir dengan cepat, *surge tank* akan menyediakan suplai air. Dengan kecepatan bukaan turbin, kecepatan dari massa air di *pressure tunnel* menjadi lebih lambat karena *pressure tunnel* terletak di permukaan horizontal. Massa air pada pipa *penstock* dalam kondisi seperti tersebut berfungsi untuk menghindari masuknya udara ke *penstock* yang dapat menambah tekanan dalam pipa (Mosonyi, 1960).

*Surge tanks* berfungsi sebagai:

- Saat terjadi penutupan turbin secara cepat, massa air yang berada di dalam *pressure tunnel* dan pipa *penstock* mengalami penurunan kecepatan. Berdasarkan inersia perpindahan massa,  $F = m \times a$ , tekanan yang sangat tinggi berada di bagian akhir pipa *penstock* yang bergerak ke arah berlawanan (*pressure wave*). Kejadian tersebut dikenal sebagai *water hammer* yang dipengaruhi oleh dimensi dan modulus elastisitas dari material pipa. Tekanan yang tinggi dari efek *water hammer* akan terus terjadi di sepanjang sistem perpipaan tertutup sampai meraih muka air pada daerah terbuka.

*Surge tank* yang berada di antara turbin dan *pressure tunnel* berfungsi untuk mengurangi *pressure wave* akibat *water hammer* dan mengalirkannya ke arah pipa *surge tank*.

- *Surge tank* berfungsi sebagai pengaman untuk pipa *penstock* dari fenomena *water hammer*. Besarnya tekanan dipengaruhi oleh panjang pipa *penstock*. *Surge tank* mengurangi tekanan yang tinggi pada *penstock* akibat dari *water hammer*.
- Sebagai penyedia air ke arah turbin saat turbin akan dinyalakan. Banyaknya air yang dibutuhkan selama proses operasi turbin akan disediakan oleh *surge tank* yang terpasang pada sistem perpipaan. Kebutuhan air yang telah dialirkan menuju turbin akan mencapai tingkat kecepatan yang dibutuhkan. Udara harus dihindari untuk masuk ke dalam pipa *penstock*, walaupun tidak ada air di dalam pipa *surge tank*.



Gambar 2. 6 Notasi Tinggi Muka Air pada *Surge Tank*

(sumber: *Hydro Electric Power Plant*, 2012)

Tinggi *surge tank* didesain berdasarkan kemungkinan tertinggi muka air yang terjadi selama pengoperasian. Variasi kebutuhan air akan mengakibatkan penutupan atau pembukaan katup atau turbin secara cepat yang diikuti dengan waktu penundaan (*time lag*) oleh massa air pada pipa. Saat penutupan katup sebagian atau penuh yang diikuti oleh penurunan beban, massa air di *penstock* akan berkurang dan suplai air dari *pressure tunnel* akan mengisi pipa *surge tank*.

Tinggi muka air di *surge tank* akan naik sampai dengan batas atas level keseimbangan statis (Gambar 2.7). Ketika terjadi pembukaan katup secara cepat, aliran air di dalam *pressure tunnel* lebih lambat daripada kebutuhan air untuk memutar turbin. Tinggi muka air di dalam pipa *surge tank* akan semakin menurun sampai berada di bawah *steady state level*. Untuk mencapai kondisi kesetimbangan aliran, tinggi muka air akan mulai untuk meningkat dari tinggi muka air terendahnya, dan akan terus bergerak naik-turun. Siklus ini akan terjadi secara berulang-ulang dengan amplitudo yang berkurang akibat adanya gesekan dengan material pipa. Fenomena ini disebut osilasi permukaan air. Tinggi maksimum amplitudo dari osilasi permukaan air dapat dihitung ketika kebutuhan air dihentikan (turbin ditutup, tidak ada pengaliran air).

#### 2.4.1 Tipe – Tipe Surge Tank

Berdasarkan pada konfigurasinya, *surge tank* diklasifikasikan sebagai berikut:

- *Simple surge tank*: pipa vertikal yang terbuka ke atmosfer dan tersambung pada sistem perpipaan.
- *Orifices surge tank*: *surge tank* yang memiliki lubang pada bagian inlet.
- *Differential surge tank*: *surge tank* yang dilengkapi dengan lubang yang disusun secara vertikal.
- *One-way surge tank*: *surge tank* dengan tipe ini dapat mengatur aliran yang mengalir dari *surge tank* ke arah *penstock* ketika tekanan di dalam pipa berada di bawah ketinggian muka air di *surge tank*.
- *Closed surge tank*: tipe *surge tank* tertutup pada bagian atasnya, dilengkapi dengan kompresor udara diantara permukaan air dan bagian penutup *surge tank*.

#### 2.4.2 Kriteria untuk Desain Surge Tanks

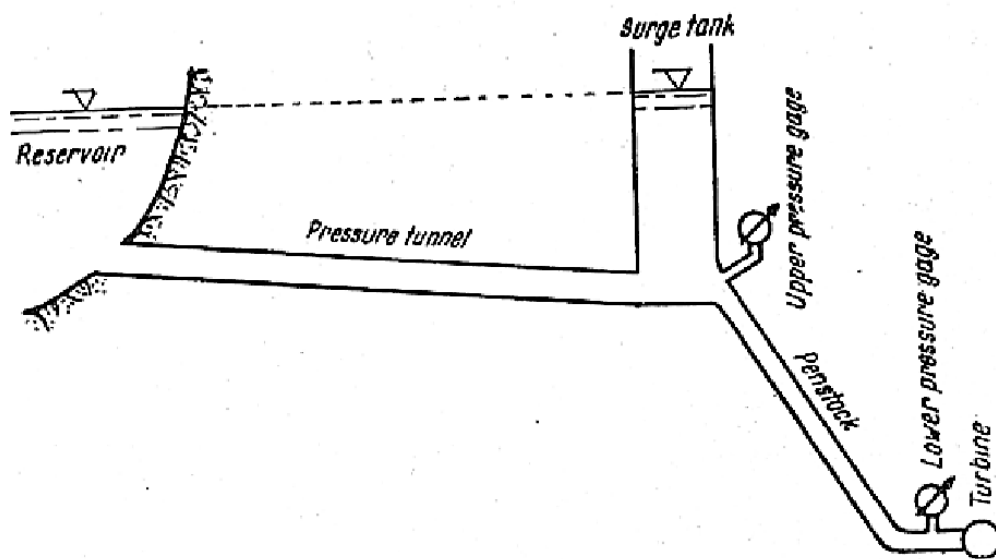
Untuk desain hidrolika *surge tank*, kriteria berikut harus dipenuhi:

- 1) *Surge tank* harus diletakkan pada batas terjadinya tekanan positif dan negatif efek *water hammer*. Lokasi pada umumnya adalah pada persambungan antara *pressure tunnel* dengan pipa *penstock*.
- 2) Pipa *surge tank* harus diletakkan dalam keadaan yang stabil. Osilasi permukaan air yang dihasilkan dari tekanan di dalam pipa tertutup (*conduit*) tidak boleh melebihi tinggi muka air pada *reservoir* atau terjadi dalam periode waktu yang lama.
- 3) *Surge tank* harus dapat menahan kondisi *load rejection* (pipa tidak dialiri air) dengan keadaan muka air tinggi atau rendah.

#### 2.4.3 Osilasi Massa pada Surge Tank

Osilasi adalah pergerakan ke depan dan ke belakang mengikuti ritme yang sama. Osilasi massa dari permukaan air pada *surge tank* terjadi karena adanya tekanan gelombang di dalam pipa. Hal ini diakibatkan karena perubahan debit turbin. Tekanan dari gelombang yang mengalir sepanjang *penstock* akan memasuki

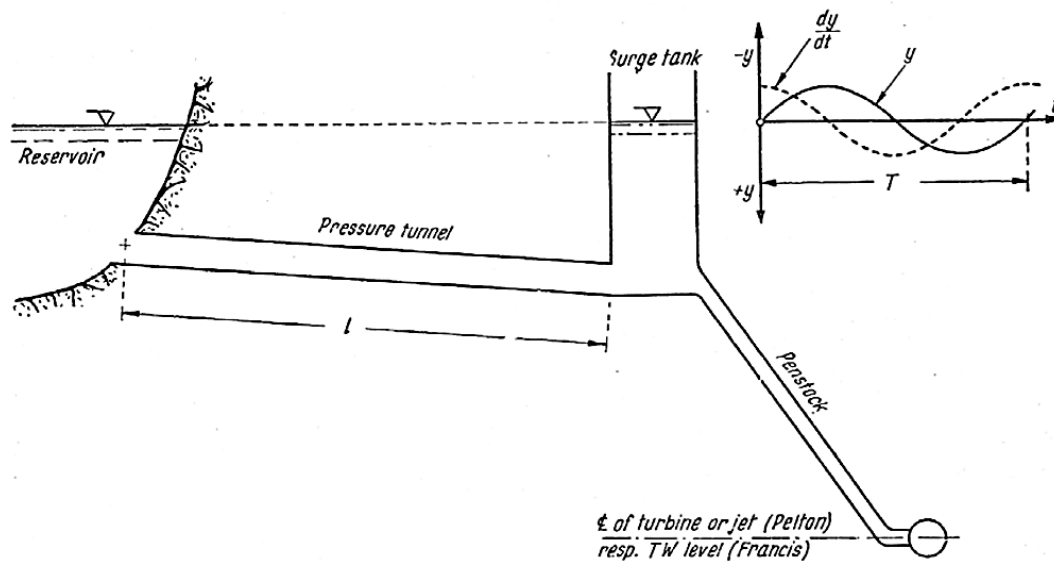
pipa *surge tank*. *Water hammer* akan memberi tekanan yang sangat besar di dalam pipa *penstock*. Tekanan ini akan menambah ketinggian muka air pada *surge tank* setelah terjadi penutupan katup turbin secara tiba-tiba. Tinggi muka air pada *surge tank* akan menjadi tidak stabil berupa penurunan dan kenaikan sampai tekanan di dalam pipa menjadi stabil. Pada saat yang bersamaan, di dalam *pressure tunnel* terjadi pergerakan air ke depan dan ke belakang, hal ini disebut dengan osilasi massa (*mass oscillation*).



Gambar 2. 7 Pemasangan Alat Ukur pada *Penstock*

(sumber: *Hydro Electric Power Plant*, 2012)

Dengan memasang manometer pada bagian atas dan bawah akhir pipa *penstock*, dapat diamati bahwa dua reaksi yang berbeda terjadi pada perubahan debit turbin (Gambar 2.8). Manometer yang berada di bawah akan mengindikasikan *pressure wave* yang bergerak dari bagian bawah *penstock*. Manometer yang berada di atas akan mengindikasikan osilasi dengan frekuensi yang rendah dan menunjukkan fluktuasi muka air pada siklus yang sama dengan *surge tank*. Aliran air yang melewati pipa akan terus mengalami penurunan kecepatan (*damped oscillations*) akibat kekasaran material pipa.



Gambar 2. 8 Undamped Oscillation pada Pressure Tunnel

(sumber: Hydro Electric Power Plant, 2012)

Dalam rumus teoritis, ketika gaya gesek terjadi pada *pressure tunnel*, tinggi muka air pada *surge tank* sama dengan tinggi air pada *reservoir* dalam kondisi berapa pun debit pada sistem perpipaan tersebut. Pada keadaan tersebut, tinggi muka air hidrostatik dan hidrodinamik adalah sama dan sumbu x dari *undamped oscillation* (Gambar 2.9) menggambarkan ketinggian hidrostatik (pada saat yang sama adalah hidrodinamik). Air pada *penstock* disuplai oleh *surge tank* dari *pressure tunnel* dengan gaya gesek yang diabaikan. Tampung air pada *reservoir* dianggap tetap.

#### 2.4.4 Perhitungan Surge Tank

Untuk menghitung amplitudo osilasi dalam pipa *surge tank*, kecepatan awal aliran dalam pipa *penstock* harus diketahui dengan langkah sebagai berikut:

$$A_p = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \quad (2.18)$$

Keterangan:

$A_p$  : luas permukaan pipa *penstock* ( $m^2$ )

$d$  : diameter pipa *penstock* (m)

Selanjutnya, luas permukaan dari pipa *surge* dihitung seperti berikut:

$$A_s = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \quad (2.19)$$



Keterangan:

As : luas permukaan pipa *surge tank* (m<sup>2</sup>)

d : diameter pipa *surge tank* (m)

Persamaan (2.20) seperti di bawah adalah untuk menghitung amplitudo dari osilasi air pada pipa *surge tank* menurut rumus teoritis.

L = 2,5 m; g = 9,81 m/s

$$Z = Q \sqrt{\frac{L}{g \cdot As \cdot Ap}} \quad (2.20)$$

Keterangan:

Z : tinggi amplitudo osilasi (m)

Q : debit aliran (m<sup>3</sup>/detik)

L : panjang pipa *surge tank* (m)

As : luas permukaan pipa *surge tank* (m<sup>2</sup>)

Ap : luas permukaan pipa *penstock* (m<sup>2</sup>)

g : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

Sementara, periode waktu osilasi air yang terjadi pada *surge tank* menurut rumus teoritis dihitung:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L \cdot As}{g \cdot Ap}} \quad (2.21)$$

Keterangan:

T : Periode waktu osilasi air

L : panjang pipa *surge tank* (m)

As : luas permukaan pipa *surge tank* (m<sup>2</sup>)

Ap : luas permukaan pipa *penstock* (m<sup>2</sup>)

g : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

## 2.5 Uji Konvergensi

Syarat urutan konvergen adalah jika nilai angka semakin besar, maka urutan tersebut akan mendekati suatu angka tertentu, dimana angka tersebut merupakan suatu limit urutan. Uji konvergensi suatu deret angka dapat dilakukan dengan tes rasio, seperti pada persamaan berikut.

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} \quad (2.22)$$

Jika nilai  $\rho < 1$ , maka deret konvergen.

Pada penelitian ini, hubungan amplitudo osilasi dengan waktu osilasi dianggap sebagai suatu deret angka. Semakin besar nilai waktu ( $t$ ), maka urutan angka amplitudo osilasi akan semakin mendekati nilai 0 (*steady state flow*) sehingga bersifat konvergen. Penentuan deret konvergen untuk aliran sampai pada saat aliran mencapai *steady state flow* adalah:

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{n+1}{100^{n+1}}}{\frac{n}{100^n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{100^{n+1}} \left( \frac{100^n}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} \left( \frac{100^n}{100^{n+1}} \right) = \frac{1}{100}$$

Karena  $\rho < 1$ , maka deret konvergen.

Jadi, keadaan aliran yang dimulai dari osilasi akan mencapai *steady state flow* pada ketelitian tinggi muka air pada *surge* hingga 0,01 m dari datum.

## BAB III

### METODOLOGI

#### 3.1 Fasilitas Penelitian

Penelitian ini merupakan uji eksperimental untuk mendapatkan variasi desain *surge tank* yang paling efektif dalam mereduksi efek *water hammer*. Uji eksperimental ini menggunakan model fisik alat *surge tank* (Gambar 3.1) yang dilakukan di Laboratorium Hidrolika dan Pantai Departemen Teknik Sipil – ITS. Alat *surge tank* dilengkapi dengan fasilitas sebagai berikut:

1. Kontainer tampungan *inflow* dimensi 90 cm x 90 cm x 30 cm (Gambar 3.2).
2. *Overflow tank* yang mengalirkan air dari *inflow* ke tampungan *reservoir* dengan batas tinggi minimal air di tampungan *inflow* adalah 17cm.
3. Kontainer tampungan *reservoir* dengan dimensi 90 cm x 90 cm x 30 cm (Gambar 3.3).
4. Pipa *penstock* terbuat dari material PVC berdiameter 15,5 cm. Pipa *penstock* pada alat ini berprofil spiral, sehingga tidak memanjang seperti keadaan pipa *penstock* pada umumnya. Hal ini akan memengaruhi kehilangan energi air yang mengalir. Panjang total pipa *penstock* alat uji adalah 240 cm.
5. Pipa *surge tank* yang terbuat dari bahan akrilik berdiameter 24 cm dengan ketinggian 200 cm. Pipa memanjang vertikal dan terbuka pada bagian atasnya.
6. Alat pengukur tinggi muka air berupa mistar ukur yang digunakan untuk mengukur tinggi muka air pada pipa *surge tank*.
7. Katup (*valve*) yang berdiamensi 20 cm dan berfungsi untuk mengoperasikan pembukaan atau penutupan aliran air. Waktu penutupan pipa sampai dengan tertutup secara sempurna adalah 1 detik.
8. Gelas ukur untuk menghitung debit secara manual.
9. *Stopwatch* untuk mengukur waktu selama fluktuasi muka air terjadi pada pipa *surge tank*.

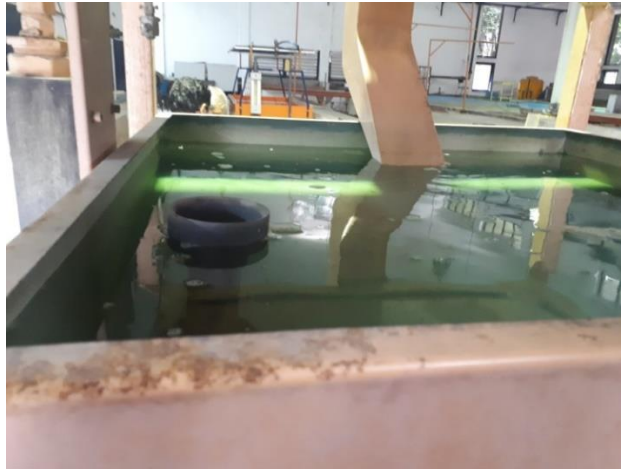


Gambar 3. 1 Alat *Surge Tank* Lab

Dalam penjelasan fasilitas model fisik di atas, berikut adalah rincian dari tiap fasilitas yang terdapat pada *surge tank*.



Gambar 3. 2 Kontainer Tampungan *Inflow* pada Alat *Surge Tank*



Gambar 3. 3 Kontainer Tampungan *Reservoir*



Gambar 3. 4 Alat Ukur Tinggi Muka Air pada *Surge Tank*

### 3.2 Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini, penjabaran mengenai metode yang akan dilakukan secara sistematis dapat dilihat pada bagan alir penelitian seperti gambar 3.5 Berikut adalah penjelasan tentang *flowchart*.

#### 3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi metode dan tahapan-tahapan yang sesuai dengan permasalahan pada penelitian. Referensi tersebut berupa langkah-langkah penyelesaian yang pernah dilakukan terkait dengan penelitian. Studi literatur ini dapat dilakukan dengan mencari bahan dari berbagai buku, jurnal dan sumber referensi lain yang sesuai dan dapat mendukung penelitian.

### 3.2.2 Desain Surge Tank (Initial Condition)

#### a. Analisis Variasi Debit

Penelitian ini akan dilakukan dengan dua variasi debit yang berbeda. Pemilihan variasi debit ini didapatkan dari tampungan *reservoir* yang mengalir melalui pipa *penstock*. Debit yang keluar dari pipa *penstock* merupakan debit *outflow* yang digunakan sebagai variabel.

Untuk mendapatkan debit *outflow*, pengukuran debit dilakukan dengan menggunakan alat berupa gelas ukur. Dengan satuan waktu menggunakan *stopwatch*, akan dilakukan perhitungan debit dan mengkonversinya ke dalam satuan debit yang sesuai.

Digunakan volume tampungan *reservoir* sebagai variabel tetap untuk mengontrol perhitungan debit yang keluar dan tekanan air.

#### b. Dimensi Pipa dan Jarak Pipa *Penstock*

Pada model eksperimen ini, akan digunakan modifikasi dimensi pipa *surge tank* dan panjang pipa *penstock*. Osilasi massa dipengaruhi oleh kedua variabel ini, oleh karena itu dilakukan perhitungan hidrolika untuk menghasilkan modifikasi setiap variasi model.

### 3.2.3 Perancangan Permodelan

Pada tahap ini dilakukan perencanaan model variasi berupa pemasangan diameter dan panjang pipa. Penelitian ini akan menggunakan beberapa pola pemasangan dengan perubahan variabel, yaitu:

#### a. Variasi Tinggi Muka Air

Pada penelitian ini akan digunakan dua variasi tinggi muka air yang diukur pada kontainer *reservoir*. Ketinggian muka air pada *reservoir* menentukan tinggi datum awal aliran yang terjadi pada pipa *surge*.

#### b. Variasi Diameter *Surge Tank* ( $d_1$ , $d_2$ , $d_3$ )

Diameter 1, 2, dan 3 merupakan alternatif desain *surge tank*. Perhitungan stabilitas dari pipa *surge tank* ditentukan oleh diameter pipa. Nilai diameter dari pipa menentukan luasan melintang dari pipa *surge tank* dan memengaruhi *friction loss* untuk menghasilkan kecepatan aliran dalam pipa *surge tank*.

c. Variasi Panjang Pipa *Penstock* (L1, L2)

Variasi L1 dan L2 digunakan untuk memodifikasi panjang pipa *penstock* yang mengalirkan air dari *reservoir* ke pipa *surge tank*.

Panjang pipa memengaruhi stabilitas osilasi massa pada pipa *penstock*. Panjang pipa *penstock* menentukan angka reduksi tekanan dalam pipa, kecepatan aliran, dan harga (cost) desain.

Analisis terhadap panjang pipa *penstock* harus dilakukan untuk menentukan efektivitas dan efisiensi desain model.

### 3.2.4 *Running Model*

*Running model* penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan volume tampungan *reservoir* tetap, dua variasi debit rencana (Q), tiga variasi diameter pipa *surge tank* (d), dan dua variasi panjang pipa *penstock* (L). Pemasangan variabel dilakukan dengan cara merubah kombinasi Q, d, dan L. *Running model* akan terus dilakukan hingga 12 kombinasi alternatif selesai dilakukan.

Pengambilan data selama *running model* dilakukan dengan pencatatan berupa teks, foto, dan video.

### 3.2.5 Kalibrasi

Kalibrasi merupakan tahapan mencocokkan parameter model dan perhitungan teoritis sehingga didapatkan model yang sesuai. Pada penelitian ini, kalibrasi secara teoritis akan dilakukan dengan beberapa landasan teori berupa rumusan yang telah dibahas pada Bab 2, sedangkan kalibrasi terhadap alat *surge tank* laboratorium sudah dilakukan.

### 3.2.6 Pengukuran dan Pencatatan

Pengukuran akan dilakukan terhadap tinggi muka air pada *surge tank* dengan menggunakan alat berupa meteran. Untuk pencatatan waktu osilasi massa, akan digunakan alat *stopwatch*. Selain itu, pengukuran yang bersifat sebagai variabel tetap, yaitu volume tampungan akan dilakukan saat persiapan alat uji. Pengamatan selama terjadi osilasi massa akan dibantu

dengan menggunakan rekaman *video* yang diletakkan pada *tripod* untuk menghasilkan kestabilan dalam pengukuran.

### **3.2.7 Analisis dan Pembahasan**

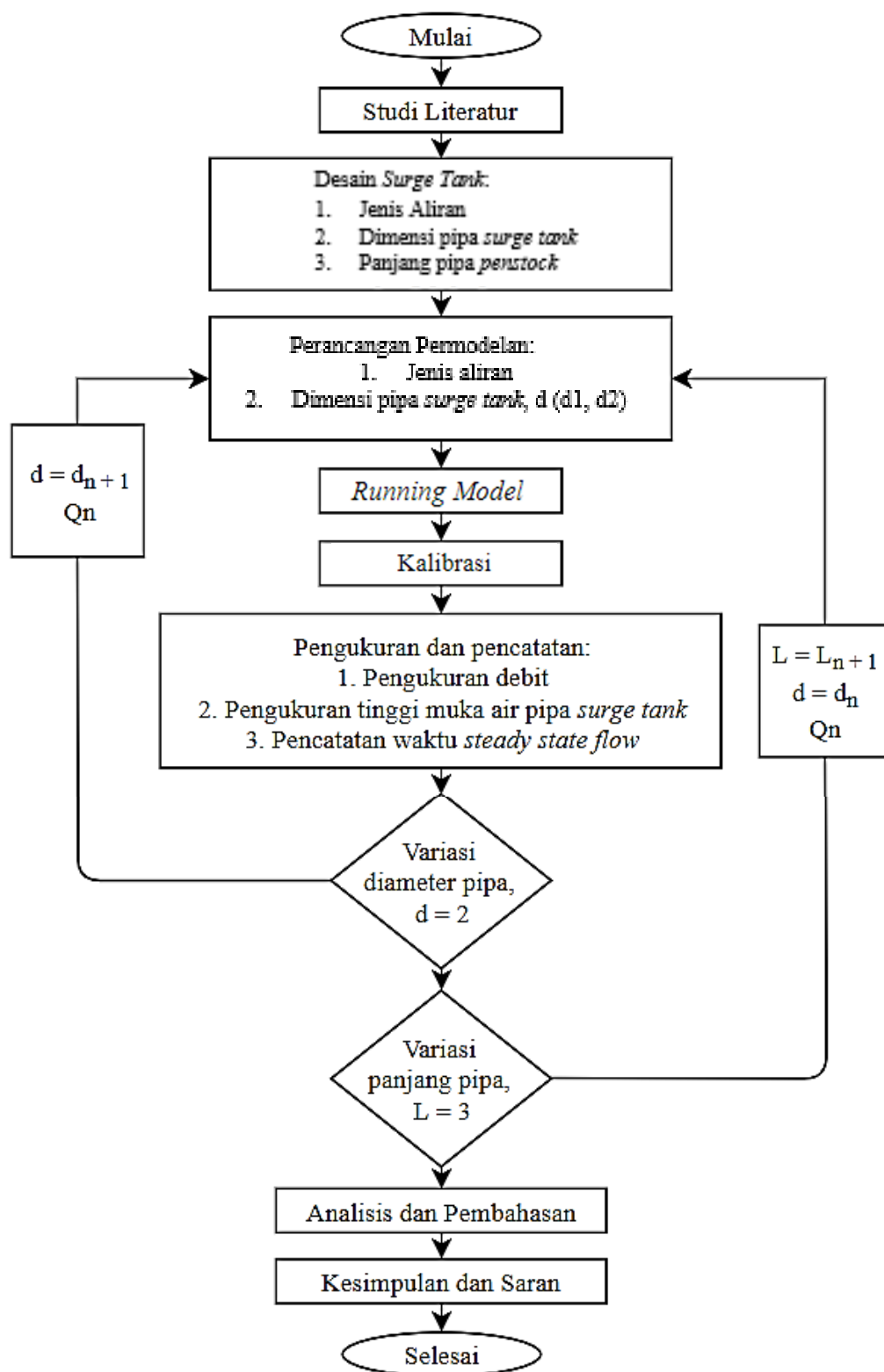
Analisis dan pembahasan dilakukan terhadap data hasil pengamatan dan pengukuran parameter perilaku hidrolika masing-masing model dengan variasi diameter dan panjang pipa. Parameter perilaku hidrolika yang akan dianalisis adalah tinggi muka air pada *surge tank* dan waktu osilasi massa. Perhitungan mengenai hidrolika akan dilakukan untuk setiap model dari percobaan alternatif variasi diameter dan panjang pipa. Semua hasil perhitungan dan analisis akan dibandingkan sehingga didapatkan model *surge tank* yang paling efektif dalam mereduksi efek *water hammer*.

### **3.2.8 Kesimpulan dan Saran**

Pada tahapan ini akan diberikan kesimpulan yang dihasilkan dari penelitian berdasarkan rumusan masalah penelitian. Saran yang diberikan oleh penulis bertujuan untuk mengembangkan penelitian ini untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya.

Gambar 3.5 berikut adalah bagan alir penelitian:





Gambar 3. 5 Bagan Alir Penelitian

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

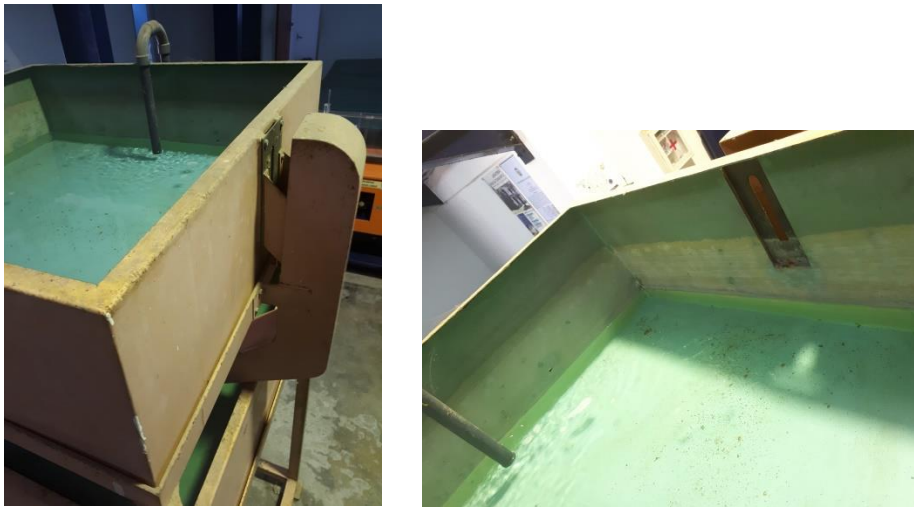
#### 4.1 Analisis Desain *Surge Tank*

Penelitian dilakukan di Laboratorium Hidrolika dan Pantai Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, alat *surge tank* seperti terlihat pada Gambar *Surge Tank* 4.1 di bawah ini. Alat *surge tank* memiliki total ketinggian 190 m yang dilengkapi dengan pipa *surge tank*. Pipa *surge tank* dipasang secara vertikal dan terbuka pada bagian atasnya dan terbuat dari bahan akrilik dengan tinggi 2 m. Alat ini dilengkapi dengan dua tampungan atas dan bawah berukuran 90 cm x 90 cm x 30 cm (Gambar 4.2). Masing- masing tampungan mempunyai *outlet*, air dari tampungan 1 akan mengalir ke tampungan 2 melalui *outlet* 1 jika tinggi air melebihi 18 cm di tampungan 1. *Outlet* tampungan 2 adalah saluran pipa *penstock* dan saluran *overflow* (Gambar 4.3).

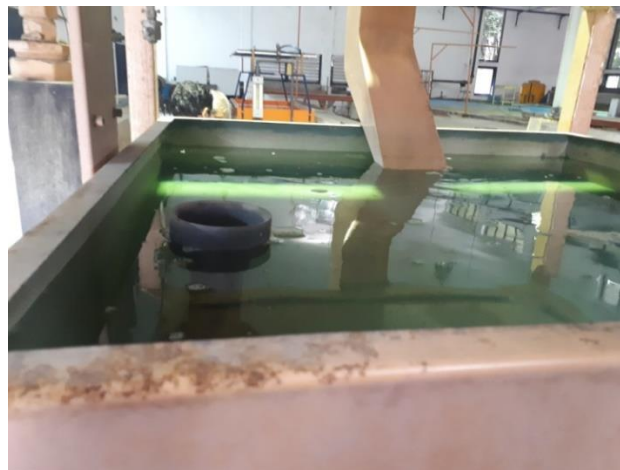


Gambar 4. 2 Alat *Surge Tank* Laboratorium (Sumber: hasil penelitian)

Saluran pipa *penstock* berada di dasar kontainer 2, sedangkan saluran *overflow* dipasang secara vertikal dengan ketinggian 28 cm dari dasar kontainer 2. Pipa *penstock* terbuat dari material paralon dengan profil berbelok (dilengkapi sambungan pipa). Total panjang pipa *penstock* sampai ke pipa *surge tank* adalah 235 cm. Pada bagian ujung pipa *penstock* terdapat *valve* yang dapat dioperasikan buka / tutup. Diameter pipa *penstock* rata- rata adalah 5,6 cm.



Gambar 4. 3 Kontainer Tampungan 1 dan Tampungan 2



Gambar 4. 4 Saluran *Overflow* pada Kontainer 2 (sumber: hasil penelitian)

Pada bagian depan alat *surge tank*, terdapat alat ukur debit *inflow* (Gambar 4.4). Fungsi dari alat ini adalah untuk mengatur debit *inflow* yang masuk ke kontainer.

Pengaturan debit *inflow* berpengaruh pada debit *outflow* dan ketinggian elevasi muka air yang terjadi pada *surge tank*.



Gambar 4. 5 Gambar Alat Ukur Debit *Inflow* (sumber: hasil penelitian)

#### 4.1.1 Analisis Variasi Debit

Debit *outflow* yang digunakan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan hasil survei air *outflow* melalui keran yang tersedia di laboratorium. *Outflow* yang digunakan untuk menjadi debit operasional *surge tank* diukur dengan alat ukur manual berupa gelas ukur dan *stopwatch*. Pengukuran debit *outflow* dilakukan sebanyak tiga kali dan hasil tersebut dirata-rata untuk dapat menghasilkan debit yang mendekati hasil yang benar.

Debit *outflow* dari hasil pengujian alat didapatkan dari rumus berikut:

$$Q_{outflow} = \frac{\text{Volume tampungan}}{\text{Waktu}} \quad (4.1)$$

Keterangan:

$Q_{outflow}$  : debit *outflow* ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Volume : tampungan yang keluar dari alat ( $\text{m}^3$ )

Waktu : waktu sampai tampungan penuh (s)

Hasil perhitungan debit untuk masing- masing variasi berbeda, seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4. 1 Perhitungan Debit *Outflow* Model

| Diameter | Qn | Volume  | waktu   | Debit   |          | Tinggi Tampungan (cm) |
|----------|----|---------|---------|---------|----------|-----------------------|
|          |    | (liter) | (detik) | (l/det) | (m3/det) |                       |
| d1       | Q1 | 6.9     | 3.1     | 2.23    | 0.0022   | 22,5                  |
|          | Q2 | 8.5     | 3.6     | 2.36    | 0.0024   | 28                    |
|          | Q3 | 8       | 3.2     | 2.50    | 0.0025   | 22,5                  |
|          | Q4 | 8.75    | 3.6     | 2.43    | 0.0024   | 28                    |
|          | Q5 | 7.3     | 3.2     | 2.28    | 0.0023   | 22,5                  |
|          | Q6 | 8       | 3.6     | 2.22    | 0.0022   | 28                    |
| d2       | Q1 | 7       | 3       | 2.33    | 0.0023   | 22,5                  |
|          | Q2 | 9.05    | 3       | 3.02    | 0.0030   | 28                    |
|          | Q3 | 6.4     | 3       | 2.13    | 0.0021   | 22,5                  |
|          | Q4 | 6.5     | 3.4     | 1.91    | 0.0019   | 28                    |
|          | Q5 | 9       | 3.4     | 2.65    | 0.0026   | 22,5                  |
|          | Q6 | 8.35    | 3.4     | 2.46    | 0.0025   | 28                    |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Berdasarkan hasil perhitungan debit pada tabel 4.1, besar debit rata-rata dari setiap variasi yang dihasilkan adalah 0,0024 m3/det.

#### 4.1.2 Analisis Variasi Diameter Pipa *Surge Tank*

Variasi terhadap diameter pipa *surge tank* dilakukan untuk mendapatkan nilai perbandingan masing-masing model *surge tank*. Berdasarkan hipotesis awal, diameter pipa *surge tank* akan berpengaruh terhadap elevasi muka air. Pipa *surge tank* terbuat dari material akrilik dengan tinggi pipa mencapai 2 m. Pipa ini disambungkan dengan pipa conduit pada alat *surge tank* dengan jarak dari pipa conduit adalah 30 cm. Berikut adalah variasi diameter pipa *surge tank* yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4. 2 Variasi Diameter Pipa *Surge Tank*

| Variasi | Diameter | Luas Permukaan |
|---------|----------|----------------|
|         | (cm)     | (cm2)          |
| d1      | 7.64     | 45.82          |
| d2      | 5.73     | 25.77          |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Perbedaan ukuran diameter 1 dan diameter 2 adalah 1.91 cm. Dalam penelitian ini akan dilihat bagaimana pengaruh yang dihasilkan oleh perbedaan diameter pipa terhadap elevasi muka air pada pipa dan lamanya waktu osilasi massa.

#### 4.1.3 Analisis Variasi Panjang Pipa *Penstock*

Variasi panjang pipa *penstock* dilakukan untuk mendapatkan perbandingan model *surge tank*. Hipotesis awal adalah pipa *penstock* yang lebih panjang akan menghasilkan waktu yang lebih cepat untuk mencapai *steady state flow* aliran di dalam pipa *penstock* saat terjadi efek *water hammer*.

Pipa *penstock* pada alat *surge tank* ini terbuat dari pipa PVC yang tersambung dengan pipa *conduit* dan pipa *surge tank*. Di bagian ujung pipa (*end pipe*) terdapat katup (*valve*) yang dapat dioperasikan untuk dibuka dan ditutup.

Berikut adalah variasi panjang pipa *penstock*.

Tabel 4. 3 Variasi Panjang Pipa *Penstock*

| Variasi | Panjang | Diameter |
|---------|---------|----------|
|         | (cm)    | (cm)     |
| L1      | 156     | 5.1      |
| L2      | 120     | 5.1      |
| L3      | 84      | 5.1      |

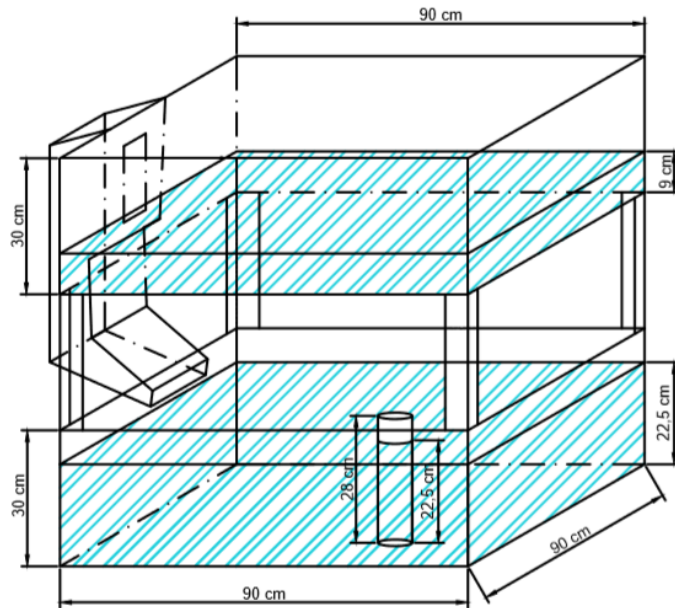
(Sumber : Hasil Perhitungan)

#### 4.2 Metode Penelitian

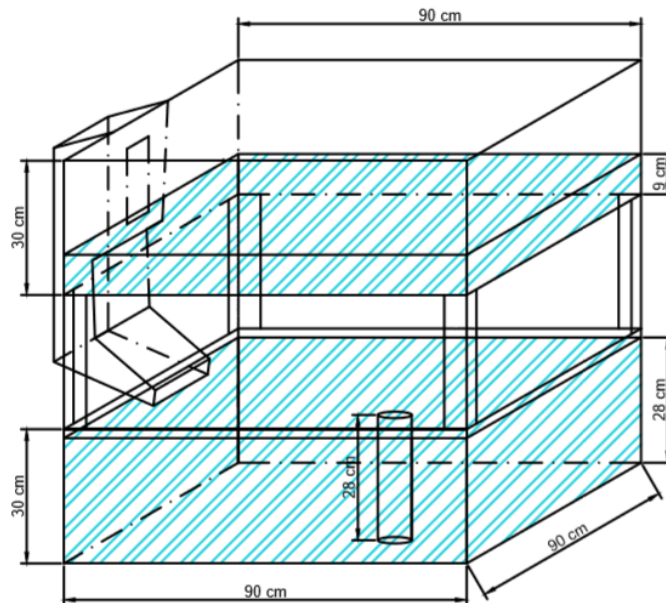
Dalam sub bab ini akan dijelaskan mengenai metode pelaksanaan penelitian dengan menggunakan alat *surge tank* dan variasi yang dilakukan.

Alat *surge tank* disiapkan seperti pada Gambar 4.2.

Penentuan variasi permodelan berupa diameter pipa *surge* ( $d_1$  dan  $d_2$ ), panjang pipa *penstock* (L1, L2, L3), dan variasi tinggi muka air pada tampungan *reservoir* (22, 5 cm dan 28 cm – Gambar 4.6 dan Gambar 4.7).



Gambar 4. 6 Tinggi Tampungan *Reservoir* 22,5 cm



Gambar 4. 7 Tinggi Tampungan *Reservoir* 28 cm

Ketinggian air pada pipa *surge tank* dapat diukur dengan menggunakan alat ukur panjang (meteran). Ketinggian awal ( $h_0$ ) pada pipa *surge* diukur dan direkam sebelum ada aliran yang mengalir keluar melalui pipa *penstock*, untuk kemudian ditentukan menjadi ketinggian datum. Berikut adalah langkah metode penelitian.



- Menentukan variasi model surge tank berupa diameter pipa *surge*, panjang pipa *penstock*, dan tinggi tampungan *reservoir*;
- Mengukur tinggi muka air pada kontainer *reservoir* (tinggi air 22,5 cm atau 28 cm);
- Menentukan tinggi muka air awal pada pipa *surge* (level datum);
- Mengatur bukaan katup pada bagian ujung *penstock* sampai aliran air yang keluar dari *penstock* stabil;
- Menutup katup secara cepat, osilasi pada pipa *surge* akan terjadi selama beberapa waktu dan direkam menggunakan alat perekam;
- Mengukur volume air yang keluar dari *penstock* dan waktu aliran untuk dijadikan sebagai debit awal aliran;
- Mencatat waktu sampai aliran kembali ke level datum (*steady state flow*).

Langkah-langkah metode penelitian tersebut akan dilaksanakan dengan model variasi alat *surge tank* yang berbeda (lihat Tabel 4.4).

### 4.3 Pengamatan dan Pengukuran

Pengamatan terhadap hasil dari memvariasikan model alat *surge tank* yang dilakukan sesuai dengan desain model seperti pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Variasi Model Alat *Surge Tank*

| Diameter Pipa<br><i>Surge Tank</i> | Panjang Pipa<br><i>Penstock</i> | Tinggi Air<br>Tampungan<br>(cm) | Model<br>Seri |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| d1 (7.64 cm)                       | L1 (156 cm)                     | 22,5                            | 1             |
|                                    |                                 | 28                              | 2             |
|                                    | L2 (120 cm)                     | 22,5                            | 3             |
|                                    |                                 | 28                              | 4             |
|                                    | L3 (84 cm)                      | 22,5                            | 5             |
|                                    |                                 | 28                              | 6             |
| d2 (5.73 cm)                       | L1 (156 cm)                     | 22,5                            | A             |
|                                    |                                 | 28                              | B             |
|                                    | L2 (120 cm)                     | 22,5                            | C             |
|                                    |                                 | 28                              | D             |
|                                    | L3 (84 cm)                      | 22,5                            | E             |
|                                    |                                 |                                 |               |

|  |  |    |   |
|--|--|----|---|
|  |  | 28 | F |
|--|--|----|---|

(Sumber: Perhitungan)

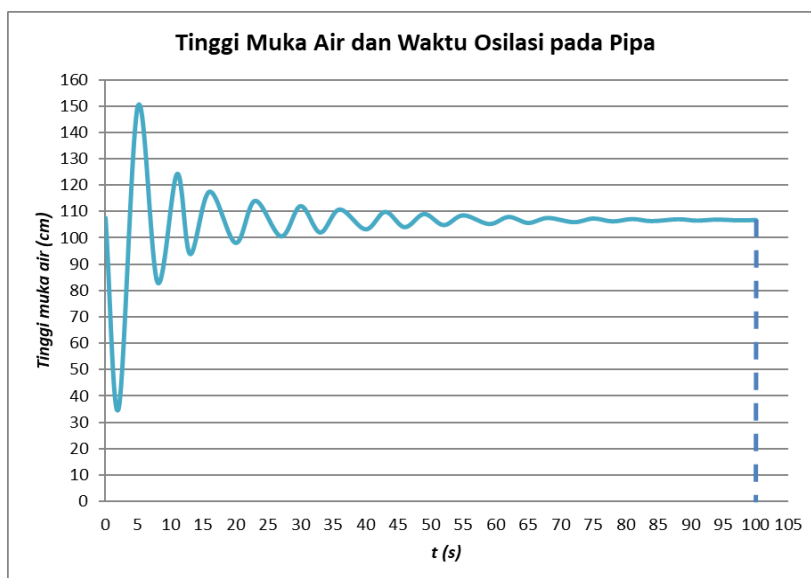
Total dari pengujian variasi alat adalah 12 macam variasi dengan menggunakan dua variasi diameter pipa *surge tank*, tiga variasi panjang pipa *penstock*, dan dua jenis aliran.

#### 4.3.1 Elevasi Muka Air

Angka elevasi muka air didapatkan dengan mengoperasikan *alat surge tank* yang semula bekerja dengan katup terbuka pada bagian ujung pipa *penstock*, lalu katup ditutup secara cepat. Efek dari penutupan katup secara cepat tersebut akan menimbulkan osilasi massa dari pipa *penstock* mengalir secara horizontal berbalik arah ke pipa *surge tank* secara vertikal.

Kenaikan dan penurunan muka air dapat diukur dengan alat ukur panjang yang ada di pipa *surge tank*. Setiap variasi diuji sehingga didapatkan nilai elevasi muka air seperti pada hasil pengamatan berikut:

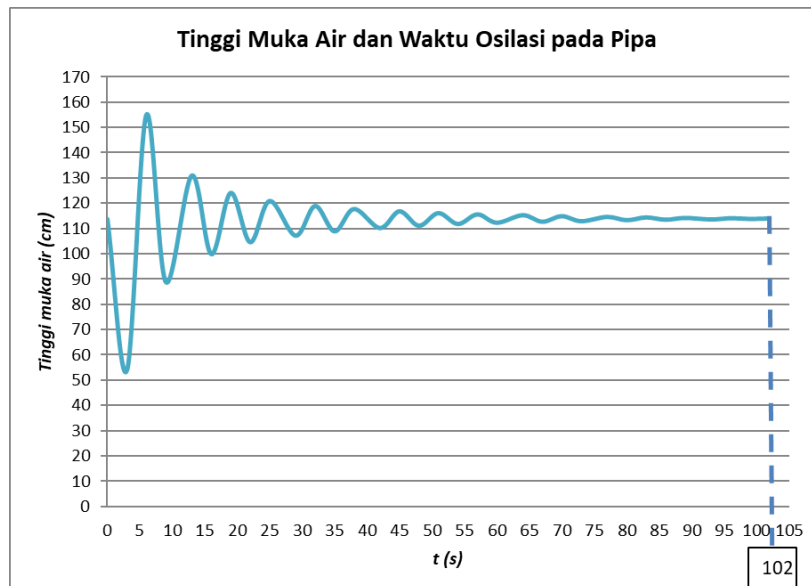
- 1) Model Diameter 1 ( $d_1 = 7,64 \text{ cm}$ )



Gambar 4. 8 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 1

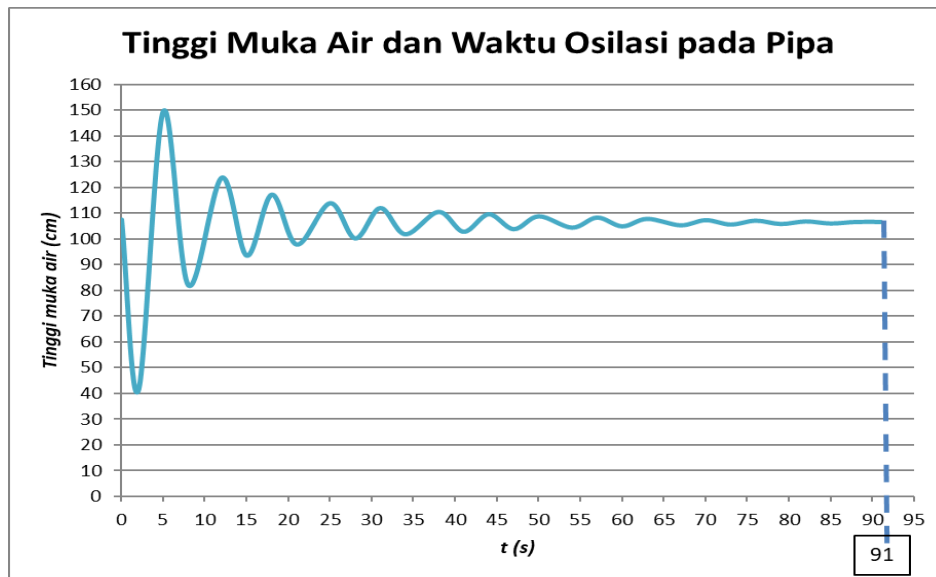
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model 1, digunakan diameter d1, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 107,5 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 156 cm dan tinggi air tampungan 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 150 cm.



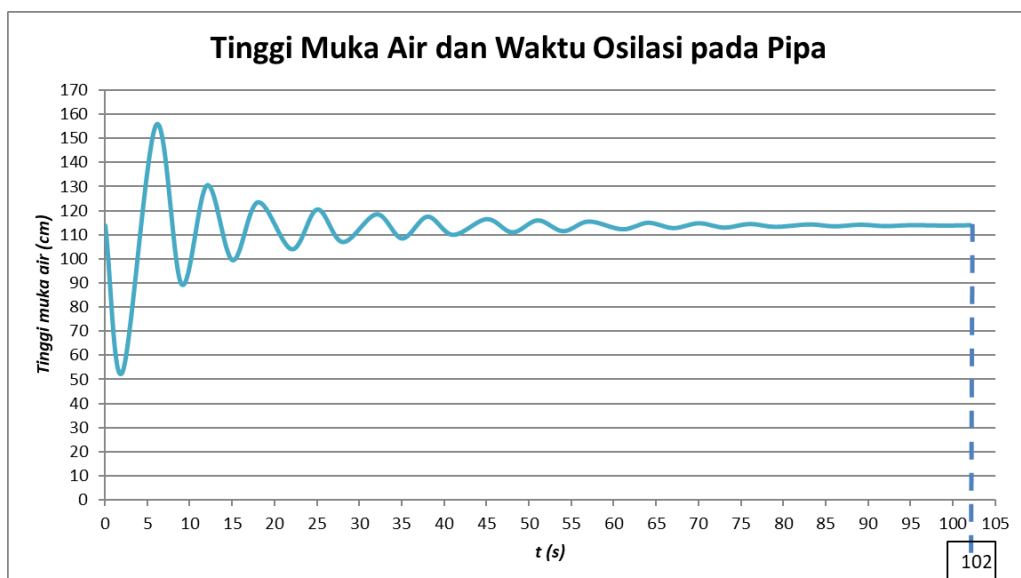
Gambar 4. 9 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 2  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model 2, digunakan diameter d1, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 113,8 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 156 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 155 cm.



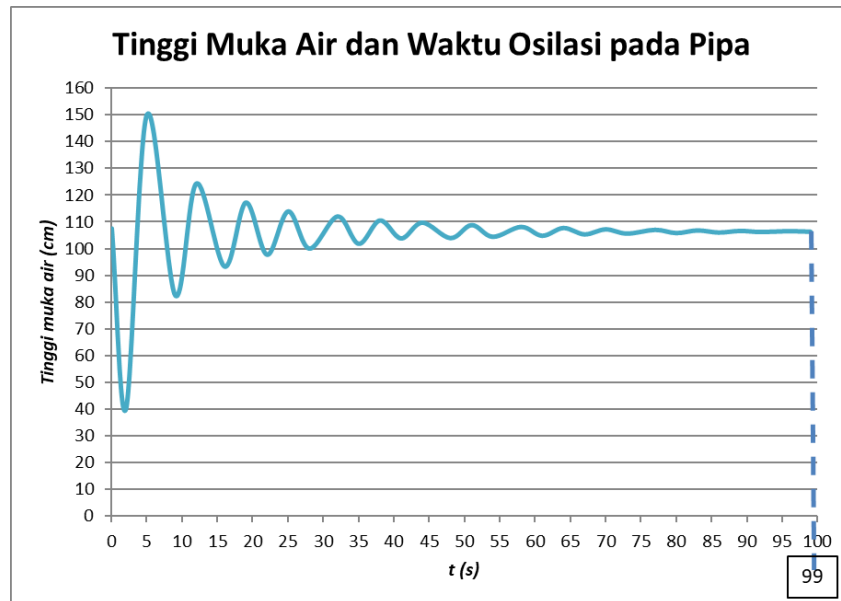
Gambar 4. 10 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 3  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model 3, digunakan diameter  $d_1$ , ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 107,5 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 120 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 149,5 cm.



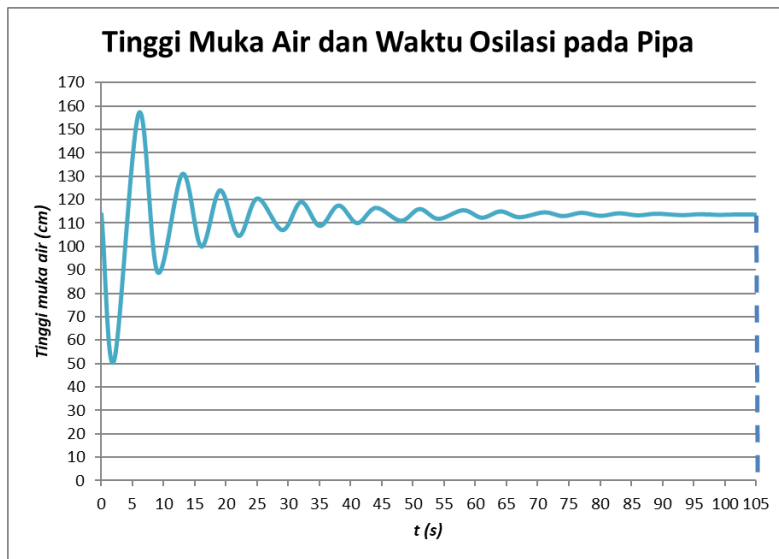
Gambar 4. 11 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 4  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model 4, digunakan diameter d1, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 113.8 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 120 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 155.5 cm.



Gambar 4. 12 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 5  
(Sumber: Perhitungan)

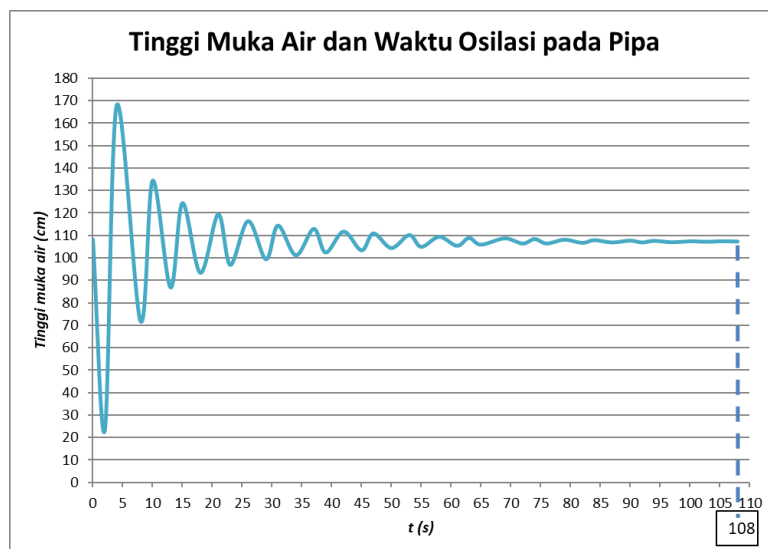
Pada percobaan Model 5, digunakan diameter d1, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 107,5 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 84 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 150 cm.



Gambar 4. 13 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model 6  
(Sumber: Perhitungan)

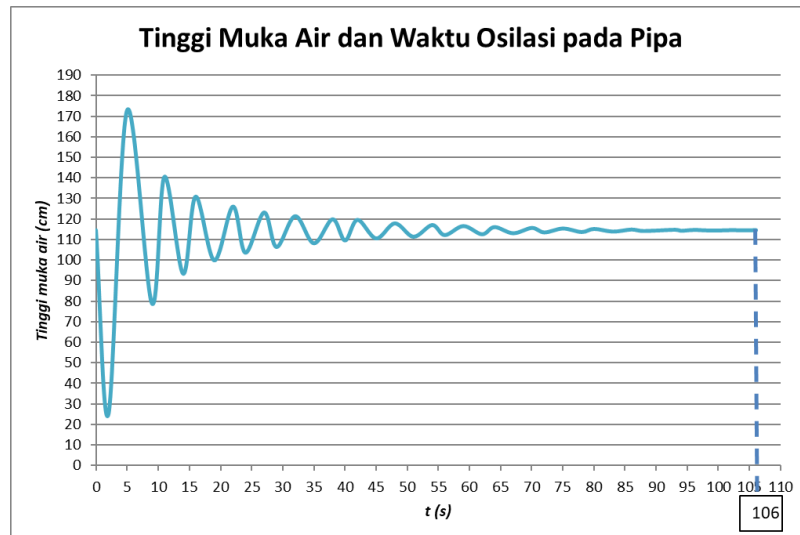
Pada percobaan Model 6, digunakan diameter  $d_1$ , ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 113.8 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 84 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 157 cm.

## 2) Model Diameter 2 ( $d_2 = 5.73$ cm)



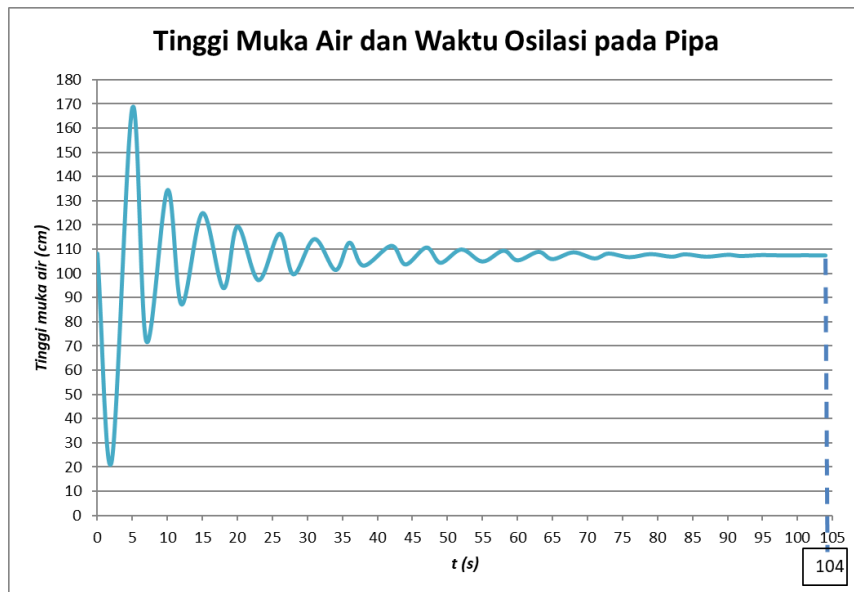
Gambar 4. 14 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model A  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model A, digunakan diameter d2, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 108,3 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 156 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 168 cm.



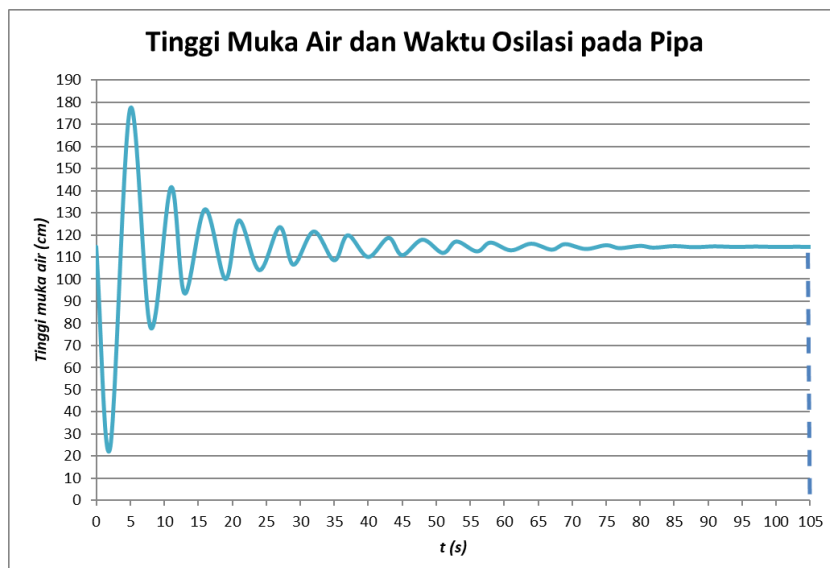
Gambar 4. 15 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model B  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model B, digunakan diameter d2, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 114,7 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 156 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 173 cm.



Gambar 4. 16 Siklus Tekanan Air pada Pipa Model C (Sumber: Perhitungan)

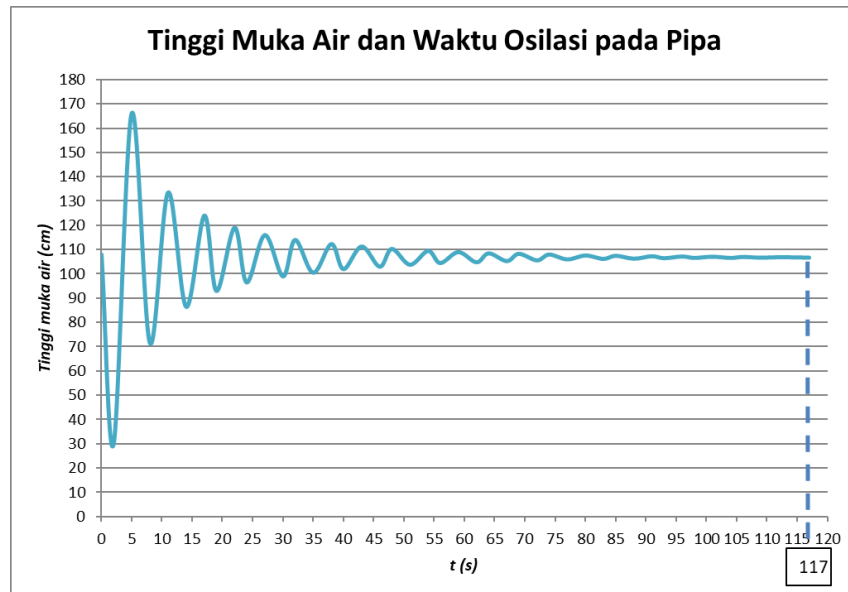
Pada percobaan Model C, digunakan diameter d2, ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 108,3 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 120 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 168,5 cm.



Gambar 4. 17 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model D (Sumber: Perhitungan)

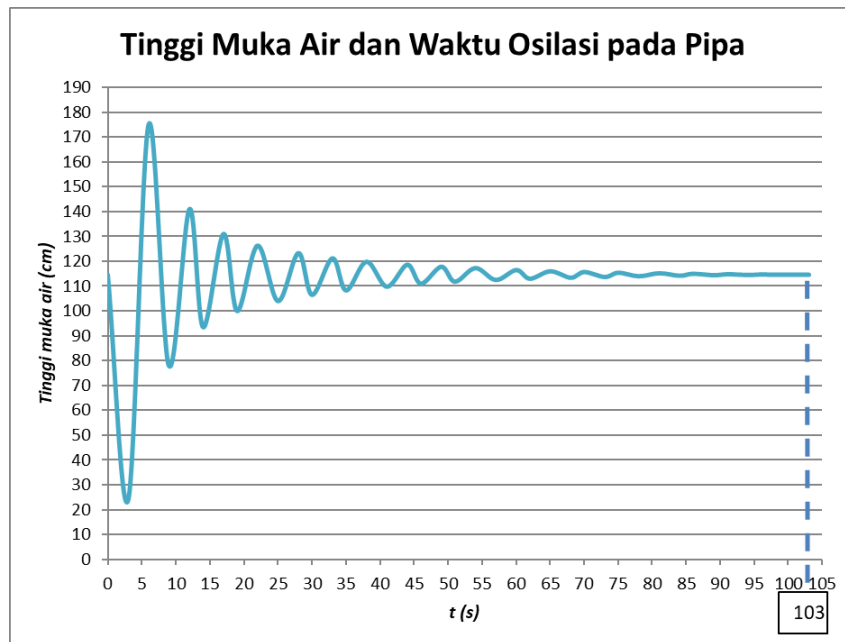


Pada percobaan Model D, digunakan diameter  $d_2$ , ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 114,7 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 120 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 177 cm.



Gambar 4. 18 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model E  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model E, digunakan diameter  $d_2$ , ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 108,3 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 84 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 22,5 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 166 cm.



Gambar 4. 19 Hubungan Tinggi Muka Air dan Waktu Osilasi pada Pipa Model F  
(Sumber: Perhitungan)

Pada percobaan Model E, digunakan diameter  $d_2$ , ketinggian muka air awal pada *surge tank* adalah 114,7 cm saat katup pada ujung pipa dibuka. Panjang pipa *penstock* adalah 84 cm dan ketinggian air pada tampungan adalah 28 cm. Ketinggian elevasi muka air maksimal yang terjadi pada pipa *surge tank* adalah 175 cm.

#### 4.3.2 Waktu *Steady State Level*

Fluktuasi muka air pada pipa *surge tank* setelah katup pada ujung pipa *penstock* ditutup akan terjadi selama beberapa saat sampai aliran air mencapai *steady state flow*. Hal ini dinamakan waktu osilasi massa atau waktu *steady state flow*. Dalam penelitian ini, pengamatan dilakukan terhadap waktu aliran dari saat katup ditutup (*unsteady*) sampai dengan aliran pada pipa *surge tank* mencapai muka air tetap.

Pengukuran waktu dilakukan dengan menggunakan alat *timer* dan *video recorder*. Berikut adalah hasil dari pengamatan waktu sampai aliran mencapai *steady state level*.

Tabel 4. 5 Tabel Hasil Pengamatan Waktu *Steady State Level*

| Diameter<br>Pipa <i>Surge Tank</i> | Panjang Pipa<br><i>Penstock</i> | Tinggi Air<br>Tampungan<br>(cm) | Model Seri | Ketinggian<br>Muka Air<br>Maksimum<br>(cm) | Waktu<br><i>Steady State</i><br>(detik) |
|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|--|---|
| d1 (7.64 cm)                       | L1 (156 cm)                     | 22,5                            | 1          | 150  | 100                                     |
|                                    |                                 | 28                              | 2          | 155  | 102                                     |
|                                    | L2 (120 cm)                     | 22,5                            | 3          | 149.5                                      | 91                                      |
|                                    |                                 | 28                              | 4          | 155.5                                      | 114                                     |
|                                    | L3 (84 cm)                      | 22,5                            | 5          | 150  | 99                                      |
|                                    |                                 | 28                              | 6          | 157  | 105                                     |
| d2 (5.73 cm)                       | L1 (156 cm)                     | 22,5                            | A          | 168  | 108                                     |
|                                    |                                 | 28                              | B          | 173  | 106                                     |
|                                    | L2 (120 cm)                     | 22,5                            | C          | 168.5                                      | 104                                     |
|                                    |                                 | 28                              | D          | 177  | 106                                     |
|                                    | L3 (84 cm)                      | 22,5                            | E          | 166  | 117                                     |
|                                    |                                 | 28                              | F          | 175  | 103                                     |

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.5 di atas, dapat terlihat bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan aliran untuk mencapai *steady state level* paling lama adalah pada model variasi d2 dengan rata-rata waktu 107,3 detik. Sementara, rata – rata waktu yang diperlukan oleh model d1 untuk mencapai *steady state level* adalah 101,8 detik.

Untuk tinggi air pada tampungan 28 cm, rata-rata waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state level* pada setiap percobaan terlihat lebih lama dibandingkan dengan tinggi air tampungan 22,5 cm. Namun, pada percobaan Model F, waktu aliran dengan tinggi air pada tampungan 28 cm mencapai *steady state* lebih cepat daripada aliran tinggian air pada tampungan 22,5 cm.

#### 4.4 Analisis Data Hasil Pengukuran

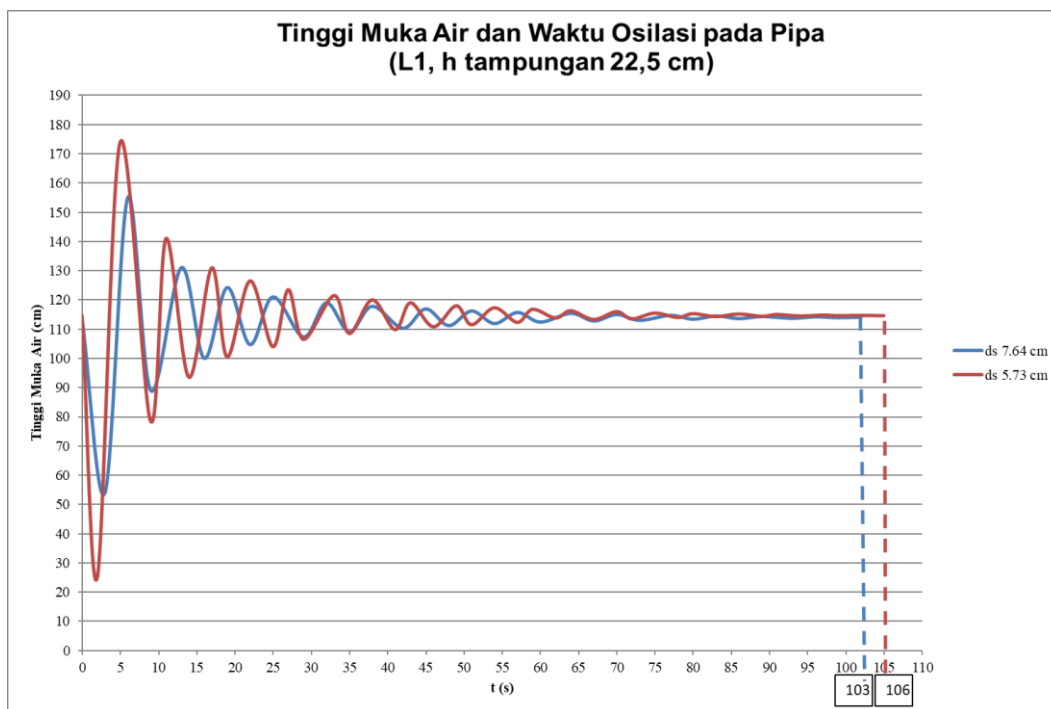
Setelah dilakukan pengamatan terhadap alat uji, dilakukan analisis data untuk dapat menghitung hasil dari penelitian. Pada bab berikut, perhitungan yang akan dilakukan meliputi:

##### 4.4.1 Variasi Diameter Pipa *Surge Tank* (d1 dan d2)

Dalam sub bab ini akan dibahas mengenai pengaruh variasi diameter terhadap kenaikan elevasi muka air pada *surge tank* dan waktu aliran untuk

mencapai *steady state level*. Variasi diameter yang digunakan adalah d1 berukuran 7,64 cm (berwarna biru) dan d2 berukuran 5,73 cm (berwarna merah) (lihat pada Gambar 20).

Osilasi yang terjadi pada pipa menurut variasi diameter dikelompokkan sesuai dengan panjang *penstock* dan jenis aliran yang sama, seperti pada grafik berikut:

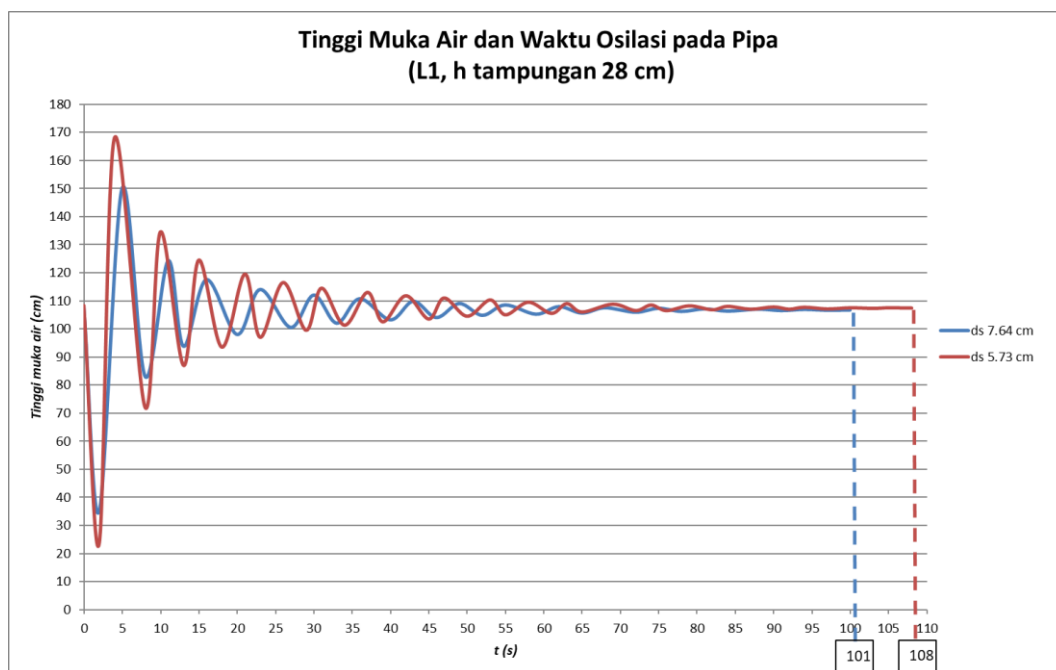


Gambar 4. 20 Perbandingan Pengaruh d1 dan d2 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (L1, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi d2 dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air d1 adalah 150 cm dan terjadi pada detik ke-4, sedangkan d2 menunjukkan angka 168 cm pada detik ke-5. Perbedaan tinggi muka air d1 dan d2 pada puncaknya adalah 18 cm dengan selisih waktu pencapaian 1 detik. Titik muka air terendah variasi d1 adalah 35 cm, sedangkan d2 adalah 23,5 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 7$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*. Waktu yang

dibutuhkan untuk mencapai level datum awal untuk diameter ukuran 5,73 cm lebih lama tiga detik dibandingkan diameter ukuran 7,64 cm.

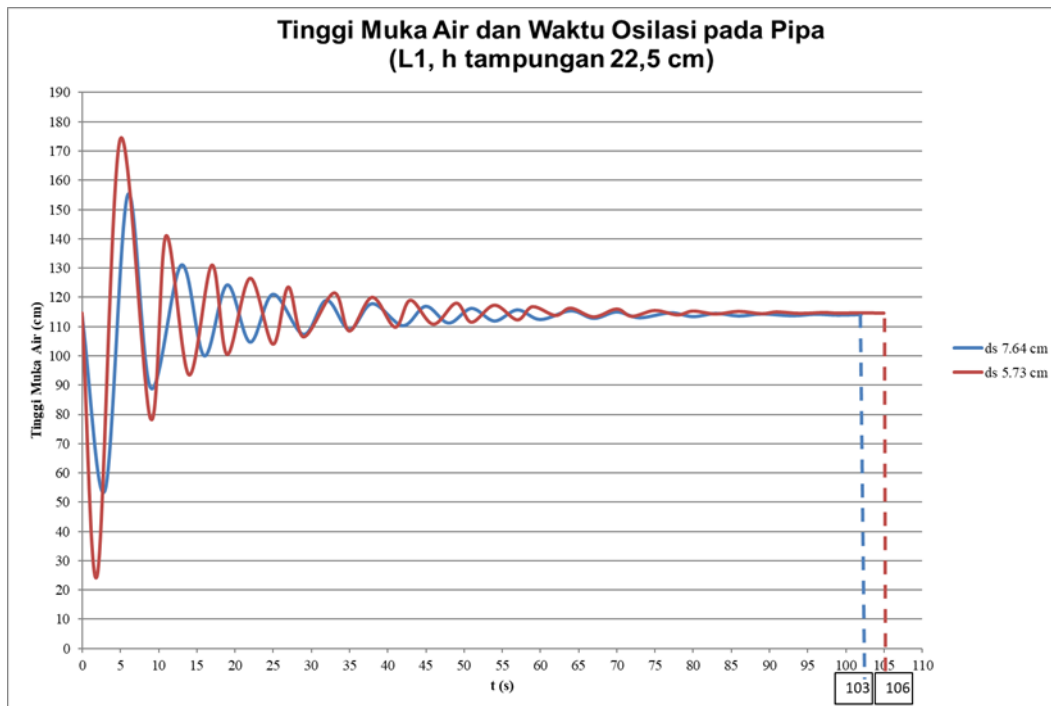
Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi d2 membutuhkan waktu selama 108 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi d1 adalah 100 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 8 detik.



Gambar 4. 21 Perbandingan Pengaruh d1 dan d2 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (L1, Tinggi Air Tampungan 28 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi d2 dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air d1 adalah 155 cm dan terjadi pada detik ke-6, sedangkan d2 menunjukkan angka 173 cm pada detik ke-5. Perbedaan tinggi muka air d1 dan d2 pada puncaknya adalah 18 cm dengan selisih waktu pencapaian 1 detik. Titik muka air terendah variasi d1 adalah 35 cm, sedangkan d2 adalah 25 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 9$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*.

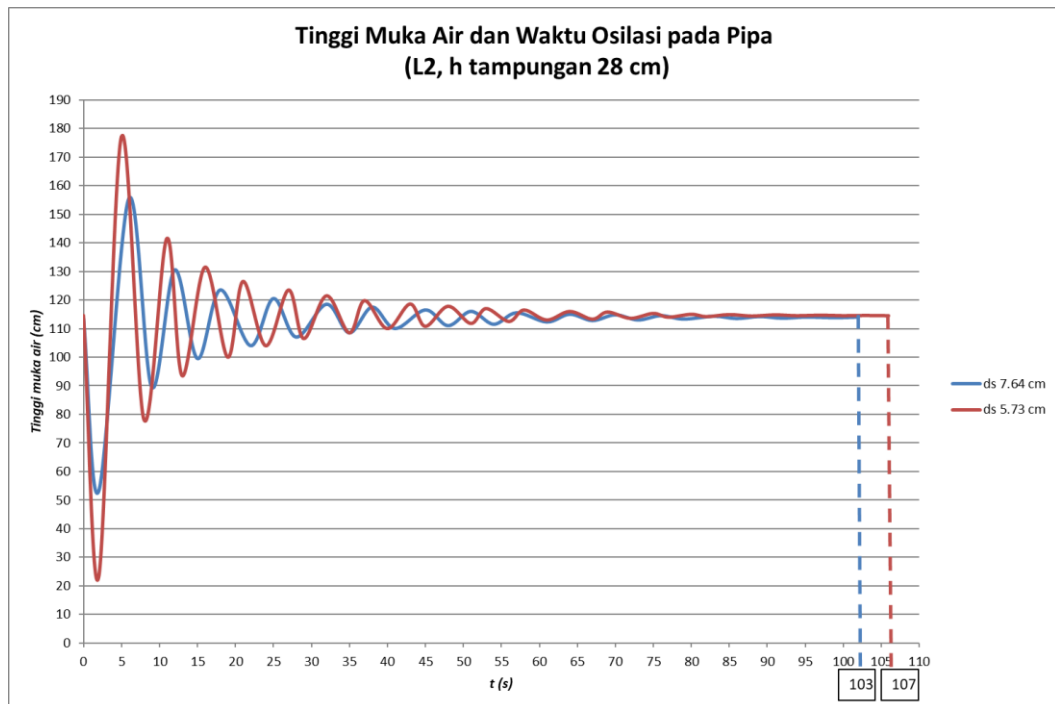
Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi d2 membutuhkan waktu selama 106 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi d1 adalah 102 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 4 detik.



Gambar 4. 22 Perbandingan Pengaruh  $d_1$  dan  $d_2$  Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* ( $L_2$ , Tinggi Air Tampungan 22,5 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi  $d_2$  dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air  $d_1$  adalah 149,5 cm dan terjadi pada detik ke-5, sedangkan  $d_2$  menunjukkan angka 177 cm pada detik ke-5. Perbedaan tinggi muka air  $d_1$  dan  $d_2$  pada puncaknya adalah 27,5 cm dengan selisih waktu pencapaian 0 detik. Titik muka air terendah variasi  $d_1$  adalah 41 cm, sedangkan  $d_2$  adalah 23 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 7$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*.

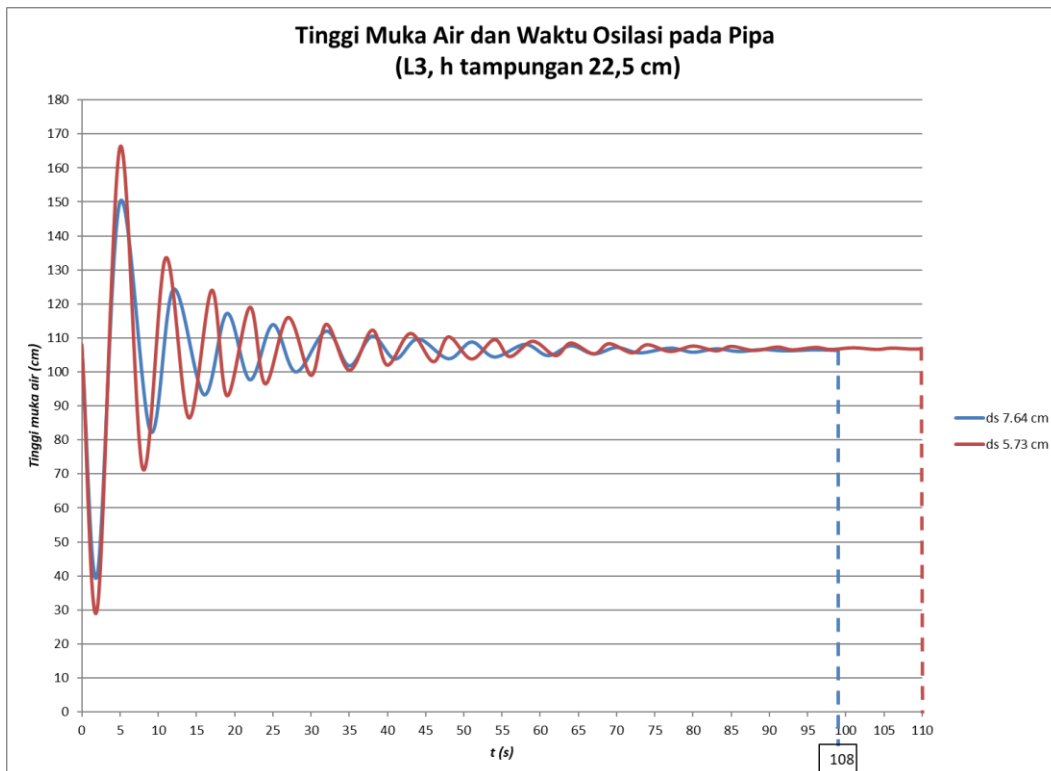
Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi  $d_2$  membutuhkan waktu selama 106 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi  $d_1$  adalah 91 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 15 detik.



Gambar 4. 23 Perbandingan Pengaruh  $d_1$  dan  $d_2$  Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (L2, Aliran Tinggi Air Tampungan 28 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi  $d_2$  dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air  $d_1$  adalah 155,5 cm dan terjadi pada detik ke-6, sedangkan  $d_2$  menunjukkan angka 177 cm pada detik ke-5. Perbedaan tinggi muka air  $d_1$  dan  $d_2$  pada puncaknya adalah 21,5 cm dengan selisih waktu pencapaian 1 detik. Titik muka air terendah variasi  $d_1$  adalah 53 cm, sedangkan  $d_2$  adalah 23 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 7$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*.

Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi  $d_2$  membutuhkan waktu selama 106 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi  $d_1$  adalah 102 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 4 detik.

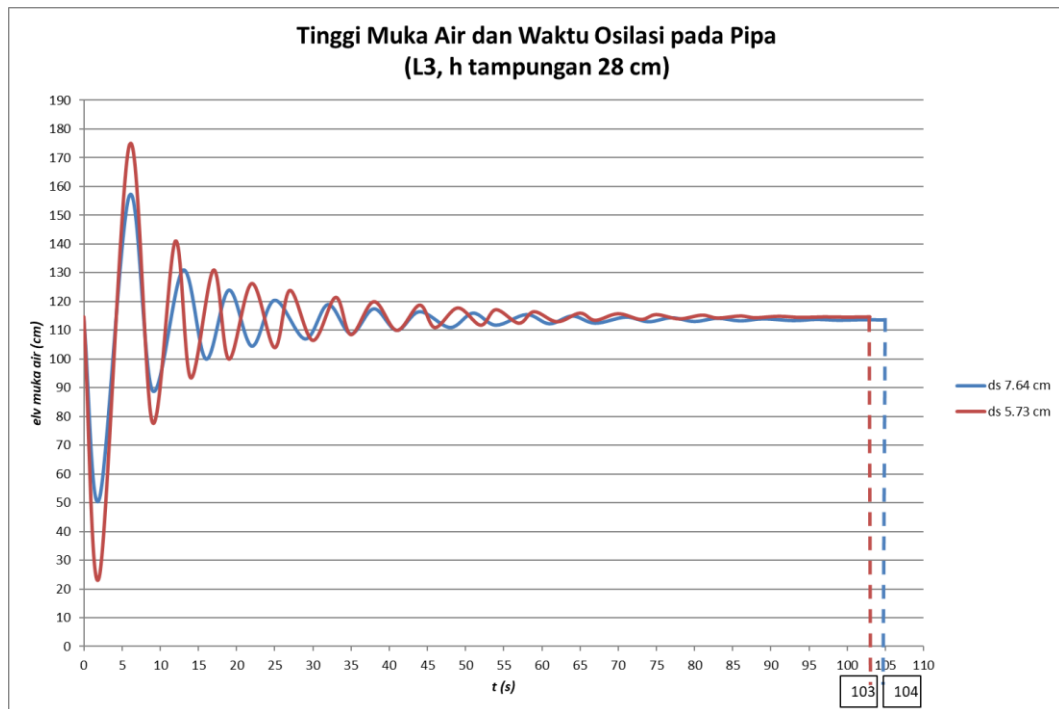


Gambar 4. 24 Perbandingan Pengaruh  $d_1$  dan  $d_2$  Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (L3, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi  $d_2$  dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air  $d_1$  adalah 150 cm dan terjadi pada detik ke-5, sedangkan  $d_2$  menunjukkan angka 166 cm pada detik ke-5. Perbedaan tinggi muka air  $d_1$  dan  $d_2$  pada puncaknya adalah 16 cm dengan selisih waktu pencapaian 0 detik. Titik muka air terendah variasi  $d_1$  adalah 40 cm, sedangkan  $d_2$  adalah 30 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 8$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*.

Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi  $d_2$  membutuhkan waktu selama 117 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi  $d_1$  adalah 99 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 18 detik.





Gambar 4. 25 Perbandingan Pengaruh d1 dan d2 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (L3, Tinggi Air Tampungan 28 cm)

Dari grafik di atas, fluktuasi muka air paling tinggi terjadi pada variasi d2 dengan diameter 5,73 cm. Ketinggian maksimum muka air d1 adalah 157 cm dan terjadi pada detik ke-6, sedangkan d2 menunjukkan angka 175 cm pada detik ke-6. Perbedaan tinggi muka air d1 dan d2 pada puncaknya adalah 18 cm dengan selisih waktu pencapaian 0 detik. Titik muka air terendah variasi d1 adalah 51 cm, sedangkan d2 adalah 24 cm. Waktu aliran untuk mencapai satu gelombang adalah  $\pm 8$  detik. Fluktuasi muka air ini akan terus berlanjut dengan ketinggian muka air yang semakin stabil sampai aliran mencapai *steady state flow*.

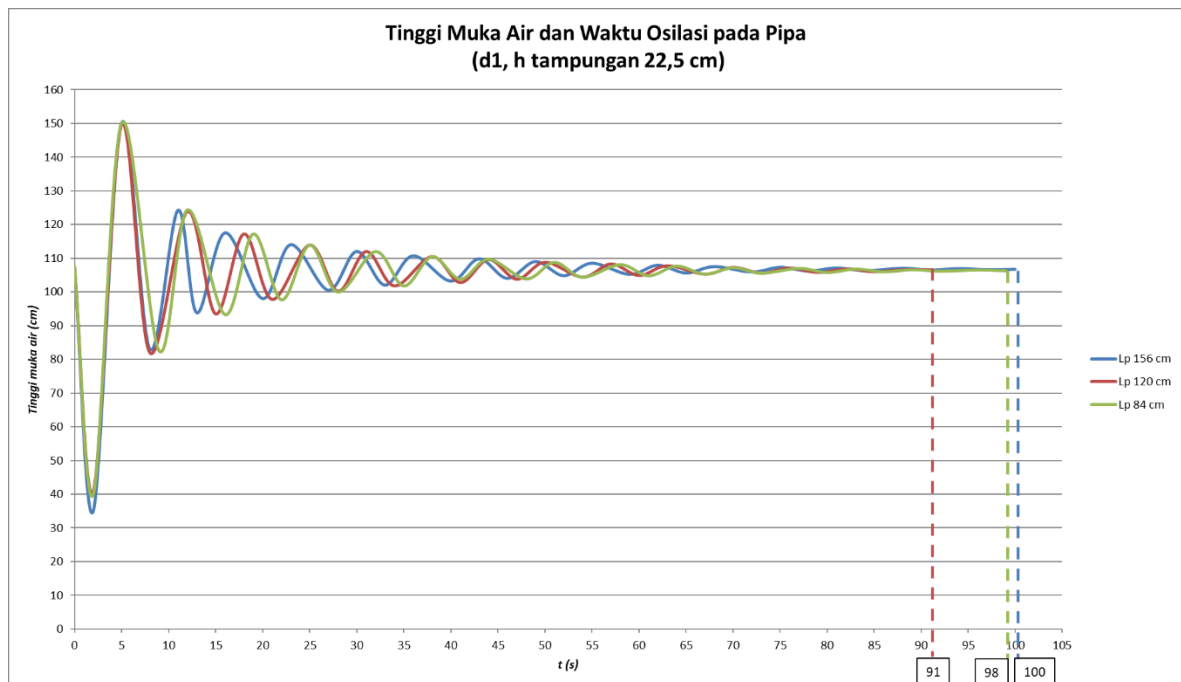
Untuk perbandingan waktu *steady state flow*, variasi d2 membutuhkan waktu selama 103 detik, sementara waktu yang diperlukan variasi d1 adalah 105 detik. Selisih waktu *steady state* kedua aliran adalah 2 detik.

Dari hasil grafik perbandingan variasi diameter pipa *surge tank*, terlihat bahwa diameter pipa *surge tank* berukuran 7.64 cm dapat mereduksi tinggi muka air pada pipa dibandingkan dengan pipa *surge tank* berdiameter 5.73 cm.

Tinggi muka air awal pada pipa saat pengujian dengan menggunakan dua variasi pipa berbeda, namun volume air pada kontainer sama. Dimeter d1 menunjukkan tinggi muka air pada pipa di angka 107,5 cm, sedangkan d2 menunjukkan tinggi muka air pada pipa di angka 108,3 cm. Hal ini disebabkan karena air memenuhi volume di pipa *surge tank* sesuai dengan luas permukaan. Variasi d2 memiliki luas permukaan yang lebih kecil dibandingkan dengan d1. Dengan volume air yang sama pada kedua variasi, d2 menunjukkan angka ketinggian elevasi yang lebih tinggi dengan selisih tinggi muka air awal 0,8 cm. Hal ini akan menunjukkan bahwa dengan memperluas diameter pipa surge tank dapat menurunkan elevasi muka air pada pipa secara signifikan.

#### 4.4.2 Variasi Panjang Pipa *Penstock* (L1, L2, L3)

Panjang pipa pesat (*penstock*) dapat memengaruhi ketinggian muka air dan waktu aliran untuk mencapai *steady state level*. Variasi tiga panjang *penstock* berukuran L1 = 156 cm (biru), L2 = 120 cm (merah), L3 = 84 cm (hijau). Dengan ketiga variasi ini, akan dilihat pengaruh terhadap elevasi muka air dan waktu *steady state*. Berikut adalah penjelasan grafik dengan memvariasikan tiga panjang pipa *penstock* yang berbeda.



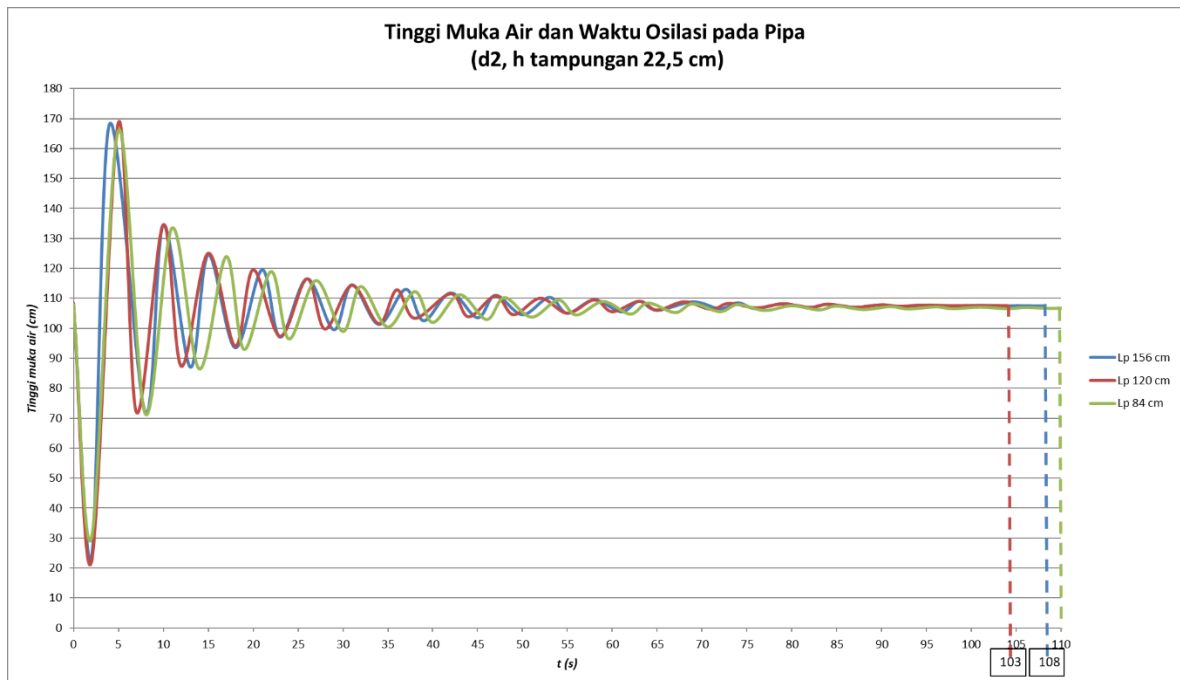
Gambar 4. 26 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (d1, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm)

Dari grafik di atas, variasi panjang pipa pesat berpengaruh pada ketinggian elevasi muka air, namun tidak signifikan. Rekapitulasi perbedaan tinggi muka air pada pipa dengan  $L1 = 150$  cm;  $L2 = 149,5$  cm;  $L3 = 151$  cm. Variasi  $L3$  menunjukkan elevasi muka air pada pipa *surge tank* paling maksimal. Untuk waktu *steady state*, variasi panjang  $L3$  membutuhkan waktu paling lama, yaitu 100 detik. Dapat terlihat waktu untuk mencapai 1 gelombang pada variasi  $L3$  lebih lama, dibandingkan dengan variasi  $L1$  dan  $L2$ .



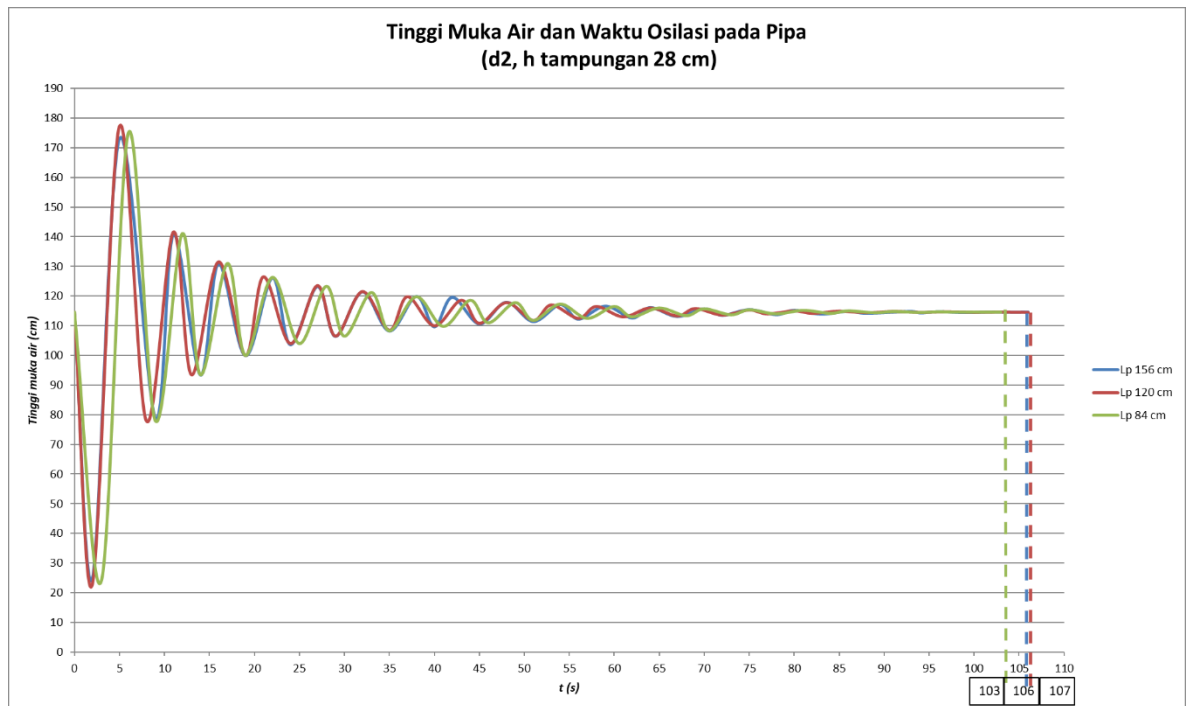
Gambar 4. 27 Pengaruh  $L1$ ,  $L2$  dan  $L3$  Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* ( $d1$ , Tinggi Air Tampungan 28 cm)

Dari grafik di atas, variasi panjang pipa pesat berpengaruh pada ketinggian elevasi muka air, namun tidak signifikan. Rekapitulasi perbedaan tinggi muka air pada pipa dengan  $L1 = 155$  cm;  $L2 = 155,5$  cm;  $L3 = 157$  cm. Variasi  $L3$  menunjukkan elevasi muka air pada pipa *surge tank* paling maksimal. Untuk waktu *steady state*, variasi panjang  $L3$  membutuhkan waktu paling lama, yaitu 105 detik. Dapat terlihat waktu untuk mencapai 1 gelombang pada variasi  $L3$  lebih lama, dibandingkan dengan variasi  $L1$  dan  $L2$ .



Gambar 4. 28 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (d2, Tinggi Air Tampungan 22,5 cm)

Dari grafik di atas, variasi panjang pipa pesat berpengaruh pada ketinggian elevasi muka air, namun tidak signifikan. Rekapitulasi perbedaan tinggi muka air pada pipa dengan L1 = 168 cm; L2 = 168,5 cm; L3 = 166 cm. Variasi L2 menunjukkan elevasi muka air pada pipa *surge tank* paling maksimal. Untuk waktu *steady state*, variasi panjang L3 membutuhkan waktu paling lama, yaitu 117 detik. Dapat terlihat waktu untuk mencapai 1 gelombang pada variasi L3 lebih lama, dibandingkan dengan variasi L1 dan L2.



Gambar 4. 29 Pengaruh L1, L2 dan L3 Terhadap Tinggi Muka Air dan Waktu *Steady State Level* (d2, Tinggi Air Tampungan 28 cm)

Dari grafik di atas, variasi panjang pipa pesat berpengaruh pada ketinggian elevasi muka air, namun tidak signifikan. Rekapitulasi perbedaan tinggi muka air pada pipa dengan  $L1 = 173$  cm;  $L2 = 177$  cm;  $L3 = 175$  cm. Variasi  $L2$  menunjukkan elevasi muka air pada pipa *surge tank* paling maksimal.

Untuk waktu *steady state*, variasi panjang  $L2$  membutuhkan waktu paling lama, yaitu 104 detik. Namun, dapat terlihat waktu untuk mencapai 1 gelombang pada variasi  $L3$  lebih lama, dibandingkan dengan variasi  $L1$  dan  $L2$ .

Dari grafik- grafik tersebut, dapat disimpulkan bahwa panjang pipa *penstock*  $L1$  156 cm dapat menurunkan elevasi muka air yang lebih rendah dan waktu *steady state* yang lebih sebentar daripada  $L2$  dan  $L3$ .

#### 4.4.3 Hubungan Ketinggian Muka Air dengan Waktu *Steady State*

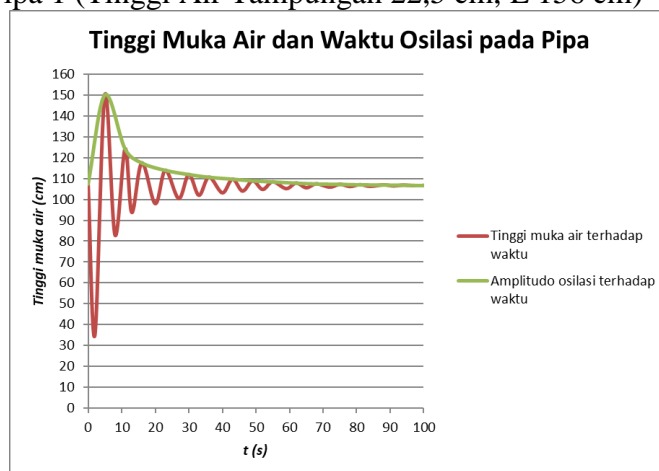
Dari perolehan data berdasarkan pengamatan, berbagai variabel kemudian dihitung untuk dapat mengetahui perbandingan masing-masing variasi. Dalam sub bab ini akan dibahas hubungan antara ketinggian muka air dan waktu *steady state* (BAB 4.2). Analisis hasil dari pengamatan dan pengukuran terhadap elevasi muka

air pada pipa *surge tank* dan waktu osilasi massa dilakukan dengan bantuan Program Minitab.

Program Minitab akan mengolah keterkaitan hubungan dua variabel dan menyajikan data berupa grafik. Selain itu, perumusan keterkaitan dua variabel juga akan dihitung sampai mendapatkan rumus empiris dengan tingkat kesalahan terkecil agar dapat menghasilkan persamaan yang mendekati hasil.

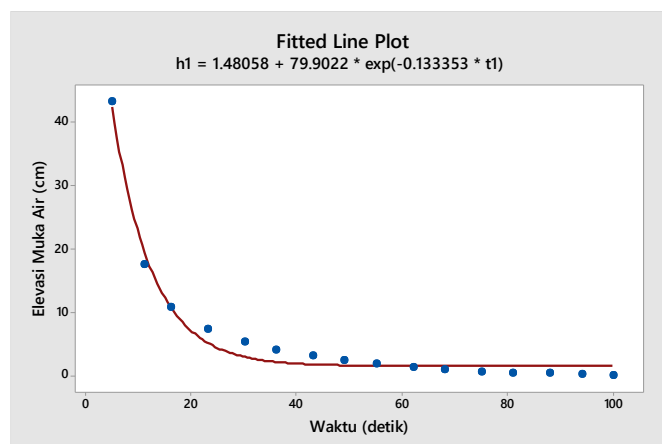
Grafik berupa hubungan antara elevasi muka air dan waktu osilasi massa adalah sebagai berikut:

1) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampung 22,5 cm, L 156 cm)



Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan Elevasi Muka Air dan Waktu *Steady State* (Hasil Pengamatan, lihat Bab 4.2)

Dari hasil pengamatan grafik di atas, selanjutnya adalah memasukkan nilai ke Program Minitab untuk menghasilkan grafik hubungan eksponensial dan perumusan. Grafik yang dihasilkan adalah sebagai berikut:



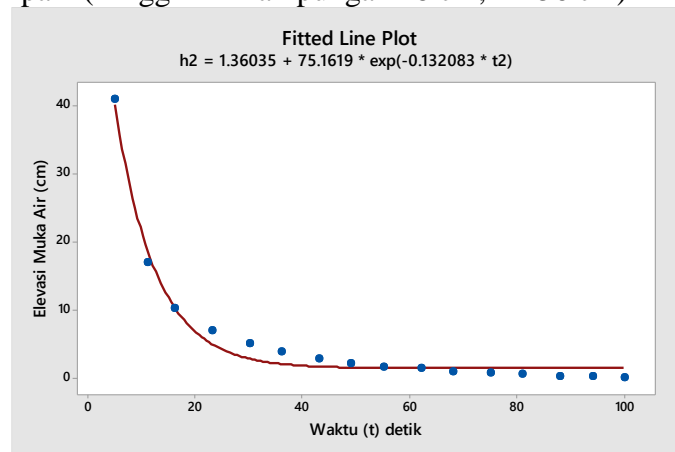
Gambar 4. 31 Grafik Regresi Asimtot 1 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 1 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.48058 + (79.9022 * e^{(-0.133353 * \text{Waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 2,3 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,5.

## 2) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampungan 28 cm, L 156 cm)



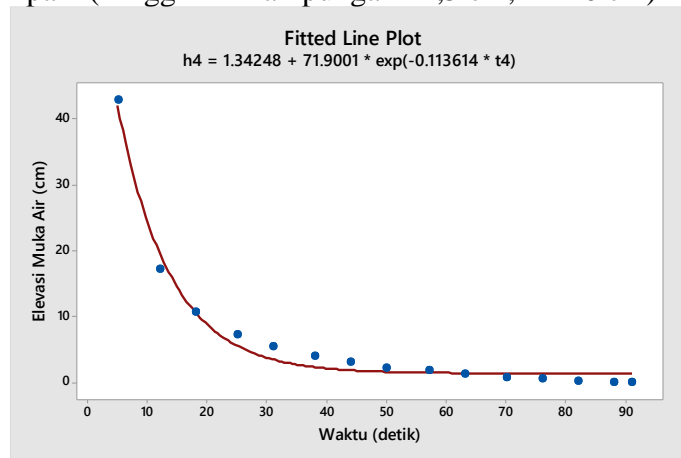
Gambar 4. 32 Grafik Regresi Asimtot 2 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 2 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.36035 + (75.1619 * e^{(-0.132083 * \text{waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 1,8 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,3.

3) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampungan 22,5 cm, L 120 cm)



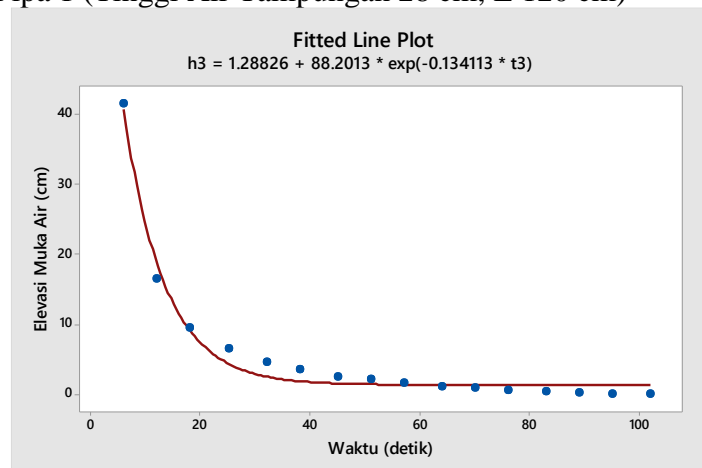
Gambar 4. 33 Grafik Regresi Asimtot 3 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 3 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.34248 + (71.9001 * e^{(-0.113614 * \text{waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 2 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,4.

4) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampungan 28 cm, L 120 cm)



Gambar 4. 34 Grafik Regresi Asimtot 4 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

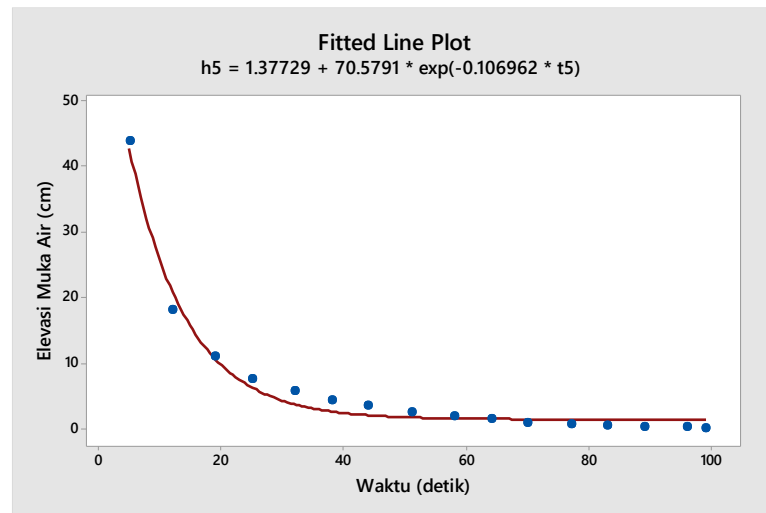


Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 4 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.28826 + (88.2013 * e^{(-0.134113 * \text{waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 1,9 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,4.

5) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampungan 22,5 cm, L 84 cm)



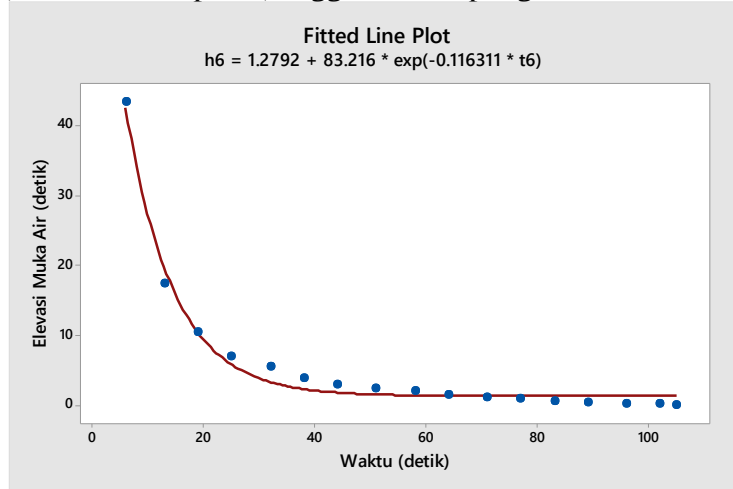
Gambar 4. 35 Grafik Regresi Asimtot 5 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 5 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.37729 + (70.5791 * e^{(-0.106962 * \text{waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 2 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,4.

6) Diameter Pipa 1 (Tinggi Air Tampungan 28 cm, L 84 cm)



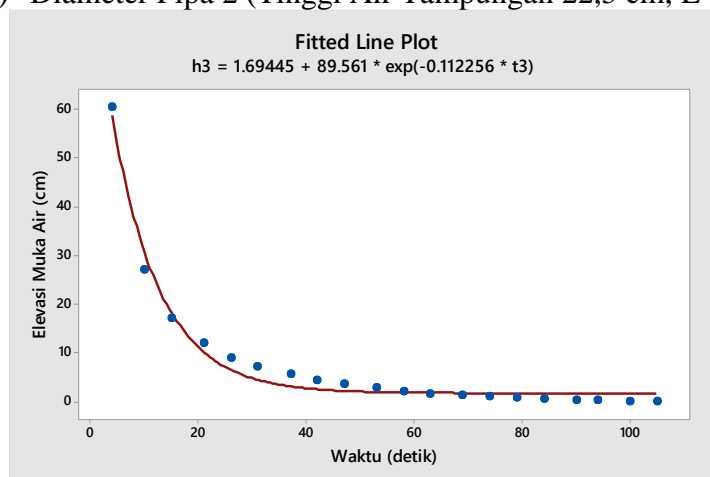
Gambar 4. 36 Grafik Regresi Asimtot 6 Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model 6 memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.2792 + (83.216 * e^{(-0.116311 * \text{waktu})})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 1.5 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,2.

7) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampungan 22,5 cm, L 156 cm)



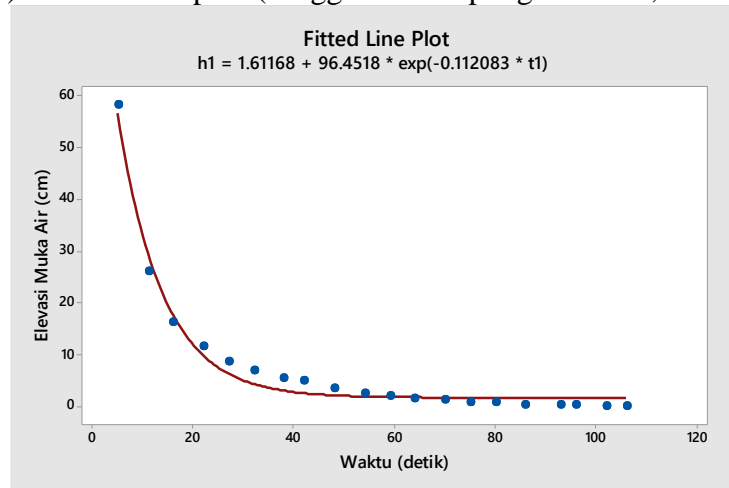
Gambar 4. 37 Grafik Regresi Asimtot Model A Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asintot tersebut, variasi Model A memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.69445 + (89.561 * e^{(-0.112256 * t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 3.5 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,8.

#### 8) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampungan 28 cm, L 156 cm)



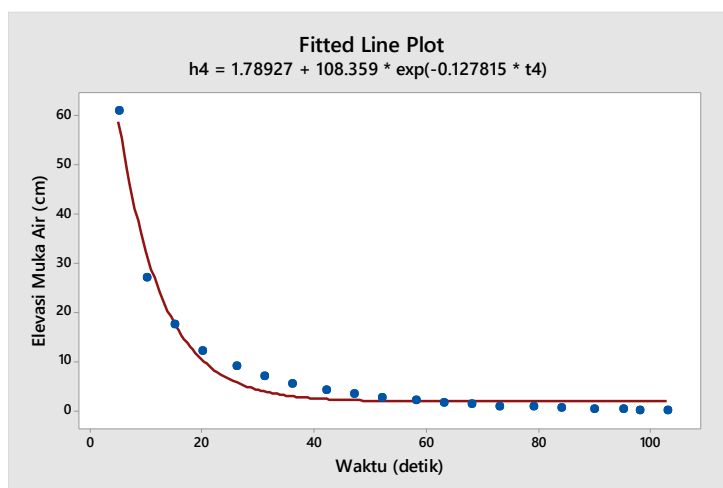
Gambar 4. 38 Grafik Regresi Asintot Model B Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asintot tersebut, variasi Model B memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.61168 + (96.4518 * e^{(-0.112083 * t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 3.5 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,8.

#### 9) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampungan 22,5 cm, L 120 cm)



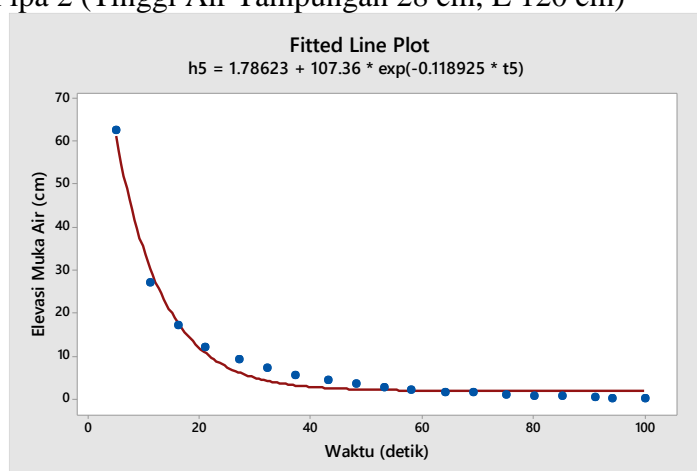
Gambar 4. 39 Grafik Regresi Asimtot Model C Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model C memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.78927 + (108.359 \cdot e^{(-0.127815 \cdot t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai  $MSE = 4.5$  dan nilai simpangan (S) sebesar 2,1.

#### 10) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampung 28 cm, L 120 cm)



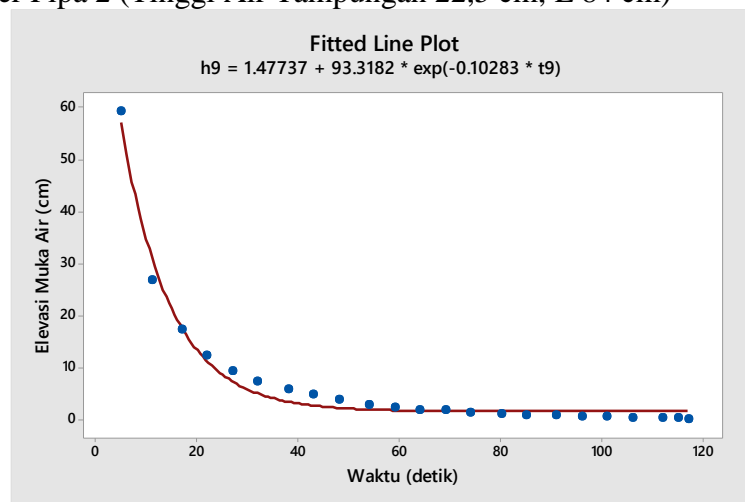
Gambar 4. 40 Grafik Regresi Asimtot Model D Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model D memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.78623 + (107.36 * e^{(-0.118925 * t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 3,6 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,9.

11) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampungan 22,5 cm, L 84 cm)



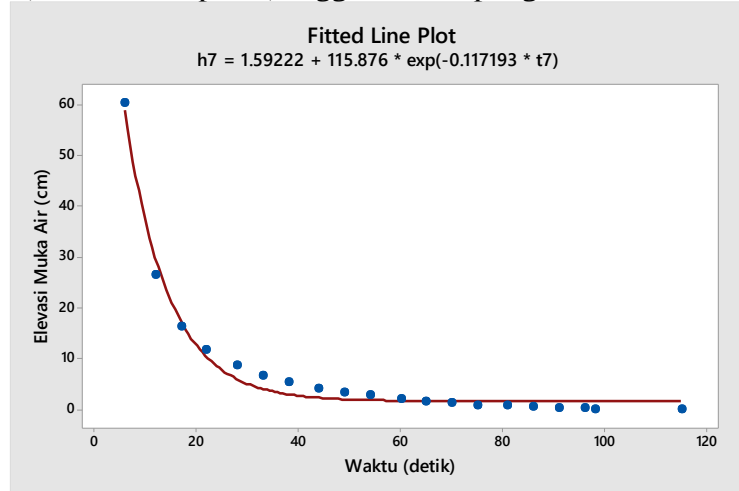
Gambar 4. 41 Grafik Regresi Asimtot Model E Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model E memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.47737 + (93.3182 * e^{(-0.10283 * t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 3 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,7.

12) Diameter Pipa 2 (Tinggi Air Tampungan 28 cm, L 84 cm)



Gambar 4. 42 Grafik Regresi Asimtot Model F Keterkaitan Elevasi Muka Air pada Pipa dan Waktu *Steady State*

Dari grafik regresi asimtot tersebut, variasi Model E memiliki hubungan elevasi muka air pada pipa *surge tank* (H) dengan waktu *steady state* berdasarkan persamaan:

$$H = 1.59222 + (115.876 * e^{(-0.117193 * t)})$$

Dari persamaan yang dihasilkan, tingkat keakuratan model peramalan dengan nilai sebenarnya ditunjukkan dengan metode nilai MSE = 3,2 dan nilai simpangan (S) sebesar 1,8.

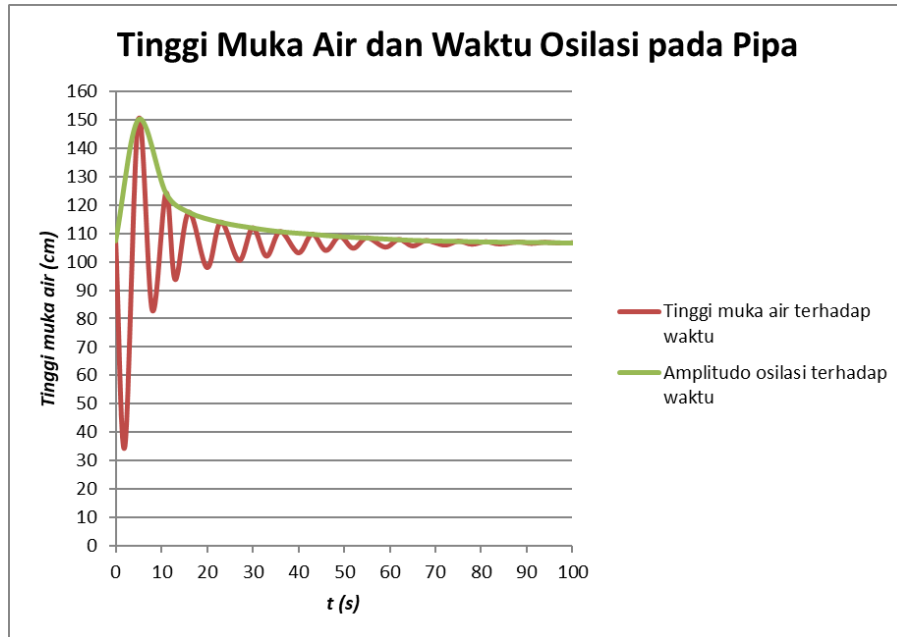
Dari perhitungan analisis pengukuran menggunakan Minitab, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara elevasi muka air pada pipa dan waktu osilasi massa merupakan hubungan eksponensial – regresi asimtot berupa persamaan:

$$\text{Tinggi muka air} = K1 + (K2 \times e^{(-K3 \times \text{waktu osilasi massa})})$$

Keterangan:

- H : tinggi muka air (cm)
- t : waktu osilasi (detik)
- K1 : konstanta 1
- K2 : konstanta 2
- K3 : konstanta 3
- e : bilangan eksponen = 2,718

Persamaan tersebut adalah fungsi eksponensial. Peninjauan terhadap persamaan eksponensial tersebut dapat dihubungkan dengan persamaan osilasi teredam. Faktor redaman diwakili oleh konstanta  $\gamma$ , dengan semakin besar nilai  $\gamma$  berarti semakin besar gesekan yang dialami benda. Sementara itu, cepat lambatnya gerakan osilasi benda ditentukan oleh nilai  $\omega$ , semakin besar  $\omega$  maka semakin cepat gerakan osilasi benda. Frekuensi osilasi ditentukan oleh  $\psi$ .



Gambar 4. 43 Grafik Siklus Tekanan Air pada Keadaan *underdamping*

Grafik hubungan tinggi muka air terhadap waktu di atas menunjukkan keadaan *underdamping*. *Underdamping* adalah keadaan saat faktor redaman lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi osilasi ( $\gamma < \omega$ ). Secara matematis, fungsi awal  $H$  berubah menjadi fungsi osilasi teredam  $x(t)$  berikut (Agus Suroso, 2017):

$$h(t) = e^{-\gamma t} (Ae^{\psi t} + Be^{-\psi t}) \quad (4.2)$$

Keterangan:

$h(t)$  : fungsi osilasi (cm)

$t$  : waktu osilasi (detik)

$A$  : konstanta 1

$B$  : konstanta 2

$\gamma$  : faktor redaman

$\psi$  : frekuensi sudut

$e$  : bilangan eksponen = 2,718

Dari persamaan osilasi teredam di atas, terlihat bahwa semakin besar nilai faktor redaman  $\gamma$ , maka frekuensi osilasi semakin kecil, dan amplitude getaran menurun lebih cepat.

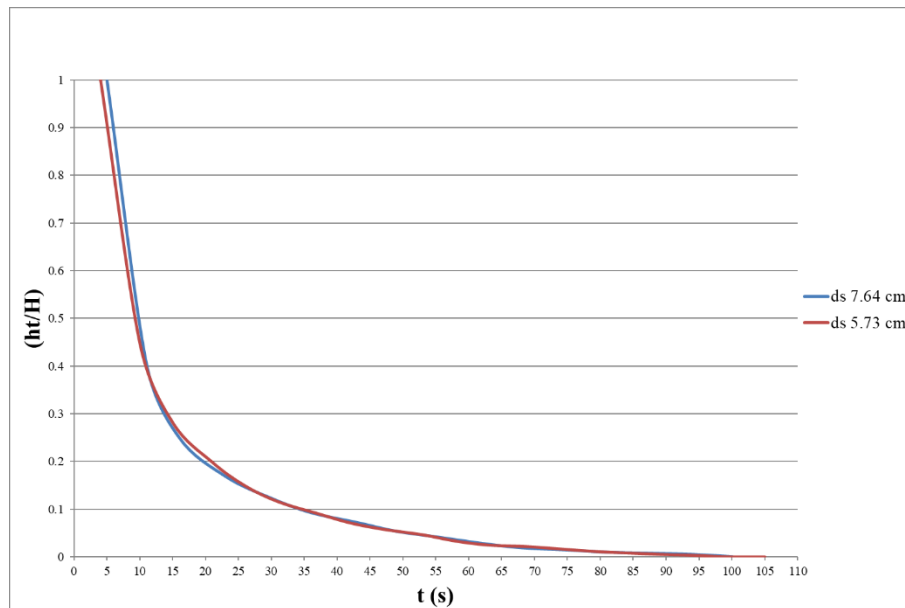
Untuk mendapatkan hasil nilai konstanta (K) yang paling sesuai dengan variasi, berikut adalah tabel persamaan nilai K masing-masing model.

Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai Konstanta (Sumber: Hasil Perhitungan)

| Diameter | Variasi Model | Nilai K |          |        |
|----------|---------------|---------|----------|--------|
|          |               | K1      | K2       | K3     |
| d1       | 1             | 1.4806  | -79.9022 | 0.1334 |
|          | 2             | 1.3604  | -75.1619 | 0.1321 |
|          | 3             | 1.3425  | -71.9001 | 0.1136 |
|          | 4             | 1.2883  | -88.2013 | 0.1341 |
|          | 5             | 1.3773  | -70.5791 | 0.107  |
|          | 6             | 1.2792  | -83.216  | 0.1163 |
| d2       | 1             | 1.6944  | -89.561  | 0.1123 |
|          | 2             | 1.6117  | -96.4518 | 0.1121 |
|          | 3             | 1.789   | -108.359 | 0.128  |
|          | 4             | 1.786   | -107.36  | 0.119  |
|          | 5             | 1.4774  | -93.3182 | 0.1028 |
|          | 6             | 1.59222 | -115.876 | 0.117  |

Dari tabel di atas, terlihat bahwa variasi d2 menggunakan angka konstanta K1 dan K2 yang lebih tinggi dibandingkan dengan d1. Sementara, angka K3 yang lebih tinggi digunakan pada variasi d1.

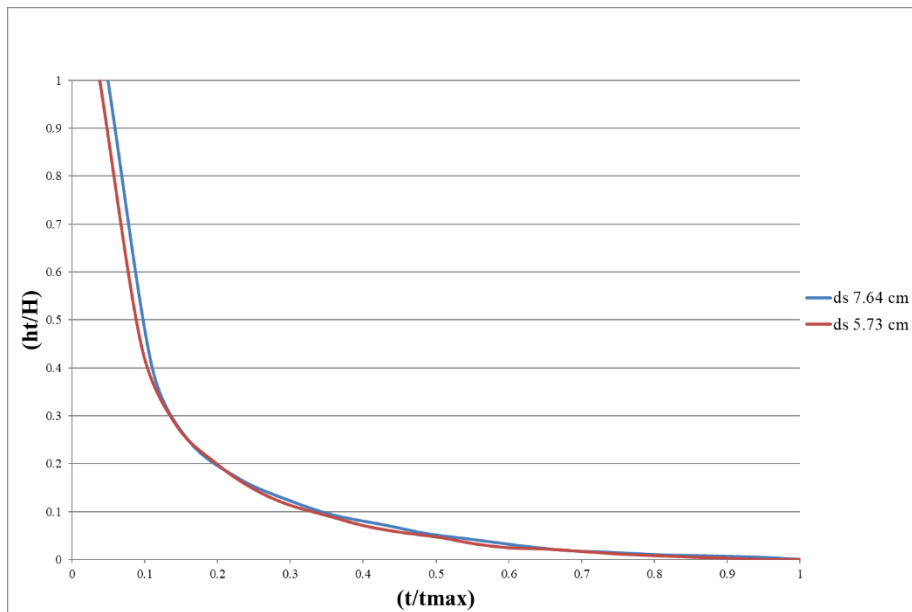




Gambar 4. 44 Grafik Hubungan  $ht/H$  terhadap Waktu

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara tinggi muka air terhadap waktu osilasi ( $ht$ ) dan tinggi muka air maksimal pada pipa *surge* ( $H$ ) terhadap waktu ( $t$ ) yang terjadi pada saat lonjakan pertama (*upsurge*). Model *surge tank* dengan diameter 7,64 cm memiliki rasio  $ht/H$  lebih besar daripada diameter pipa 5,73 cm. Frekuensi osilasi pipa dengan diameter 5,73 cm lebih cepat mencapai amplitudo osilasi tertinggi pada waktu ke- $t$ , namun membutuhkan waktu mencapai *steady state* lebih lama dibandingkan pipa dengan diameter 7,64 cm.

Grafik 4.45 memperlihatkan hubungan antara  $ht/H$  dan waktu osilasi per amplitudo dengan waktu *steady state condition*. Model *surge tank* dengan diameter 5,73 cm mencapai ketinggian amplitudo lebih awal dengan simpangan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan model *surge tank* berdiameter 7,64 cm.



Gambar 4. 45 Grafik Hubungan  $ht/H$  terhadap  $t/t_{max}$

#### 4.4.4 Perhitungan Efek *Water Hammer* dan *Surge Tank*

##### a. Tekanan Aliran pada Pipa *Penstock*

Berdasarkan pengamatan dan pengukuran, dilakukan perhitungan efek *water hammer* yang terjadi pada pipa *penstock*. Perhitungan ini bertujuan untuk dapat mengetahui tekanan yang terjadi pada pipa *penstock* selama terjadi efek *water hammer*.

Berikut adalah perhitungan tekanan dalam pipa:

Kecepatan gelombang, atau biasa disebut dengan seleritas, adalah fungsi teoritis dari seleritas gelombang. Rumus untuk *theoretical wave celerity* adalah:

$$\begin{aligned}
 c' &= \sqrt{\frac{K}{\rho}} \\
 &= \sqrt{\frac{2.2 \times 10^9}{1000}} \\
 c' &= 1483.2 \text{ m/s}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Keterangan:

- $c'$  : *theoretical wave celerity* (m/s)  
 $K$  : *bulk modulus* (air =  $2.24 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ )  
 $\rho$  : massa jenis air ( $\text{kg/m}^3$ )

Kecepatan gelombang adalah fungsi komposit dari modulus elastisitas dari pipa, sistem perpipaan, diameter pipa, dan ketebalan dinding pipa. Setelah menghitung *theoretical wave celerity*, persamaan 2 digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang yang terjadi di dalam pipa dan kekakuan pipa oleh kecepatan aliran.

$$\begin{aligned}
 c &= \sqrt{\frac{1}{\rho \left( \frac{1}{K} + \frac{D}{Ee} \right)}} \\
 &= \frac{1}{1000 \left( \frac{1}{2.2 \times 10^9} + \frac{0.055}{2.9 \times 10^9 \times 0.002} \right)} \\
 &= 1483,17 \text{ m/s}
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Keterangan:

- $c$  : seleritas tekanan gelombang (m/s)
- $\rho$  : massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)
- $K$  : *bulk modulus* fluida (air =  $2,24 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>)
- $D$  : diameter pipa (m) = 0,055 m
- $e$  : ketebalan dinding pipa (m) = 0,002 m
- $E$  : young's modulus pipa (PVC =  $2,9 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>)

Tekanan maksimum yang dihasilkan oleh efek *water hammer* pada pipa ditentukan oleh persamaan momentum. Berikut adalah Rumus Joukowsky untuk perhitungan tekanan dalam pipa.

$$\begin{aligned}
 P &= \rho c V \\
 &= 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1483,17 \text{ m/s} \times 0.937 \text{ m/s} \\
 &= 1.390.227 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Keterangan:

- $P$  : tekanan dalam pipa (N/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : seleritas tekanan gelombang (m/s)
- $v$  : kecepatan fluida (m/s)

Berikut adalah tabel perhitungan untuk mengetahui tekanan air dalam pipa pada masing-masing variasi.

Tabel 4. 7 Tekanan Air di Dalam Pipa dan *Safety Factor* Material

| Model Seri | Diameter | Volume  | Waktu   | Debit   |          | Kecepatan Air di Pipa | Tekanan Air di Pipa |       | <i>Safety Factor</i><br>( <i>SF</i> > 2) |
|------------|----------|---------|---------|---------|----------|-----------------------|---------------------|-------|--|
|            |          | (liter) | (detik) | (l/det) | (m3/det) | (m/detik)             | (N/m2)              | bar   |  |
| (1)        | (2)      | (3)     | (4)     | (5)     | (6)      | (7)                   | (8)                 | (9)   | (10)                                     |
| 1          | d1       | 6.9     | 3.1     | 2.23    | 0.0022   | 0.937330              | 1,390,227           | 13.90 | 2.63                                     |
| 2          |          | 8.5     | 3.6     | 2.36    | 0.0024   | 0.994309              | 1,474,737           | 14.75 | 2.61                                     |
| 3          |          | 8       | 3.2     | 2.50    | 0.0025   | 1.052798              | 1,561,486           | 15.61 | 2.58                                     |
| 4          |          | 8.75    | 3.6     | 2.43    | 0.0024   | 1.023553              | 1,518,112           | 15.18 | 2.59                                     |
| 5          |          | 7.3     | 3.2     | 2.28    | 0.0023   | 0.960678              | 1,424,856           | 14.25 | 2.62                                     |
| 6          |          | 8       | 3.6     | 2.22    | 0.0022   | 0.935820              | 1,387,988           | 13.88 | 2.63                                     |
| A          | d2       | 7       | 3       | 2.33    | 0.0023   | 0.982611              | 1,457,387           | 14.57 | 2.61                                     |
| B          |          | 9.05    | 3       | 3.02    | 0.0030   | 1.270376              | 1,884,194           | 18.84 | 2.49                                     |
| C          |          | 6.4     | 3       | 2.13    | 0.0021   | 0.898387              | 1,332,468           | 13.32 | 2.65                                     |
| D          |          | 6.5     | 3.4     | 1.91    | 0.0019   | 0.805081              | 1,194,078           | 11.94 | 2.70                                     |
| E          |          | 9       | 3.4     | 2.65    | 0.0026   | 1.114727              | 1,653,338           | 16.53 | 2.55                                     |
| F          |          | 8.35    | 3.4     | 2.46    | 0.0025   | 1.034219              | 1,533,931           | 15.34 | 2.59                                     |

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Keterangan Tabel 4.7:

Kolom (1) : model variasi alat *surge tank*

Kolom (2) : variasi diameter d1 dan d2

Kolom (3) : volume untuk pengukuran debit *outflow* (kolom 5)

Kolom (4) : waktu untuk pengukuran debit *outflow* (kolom 5)

Kolom (5) :  $Q = \frac{\text{volume tampungan}}{\text{waktu}} = \frac{\text{kolom 3}}{\text{kolom 4}}$  (l/detik)

Kolom (6) :  $\frac{\text{kolom 5}}{1000}$  (m3/detik)

Kolom (7) :  $v = \frac{Q}{A} = \frac{\text{kolom 6}}{0,25 \times \pi \times \text{diameter penstock}^2}$

Kolom (8) : perhitungan Persamaan 3

Kolom (9) :  $\frac{\text{kolom 8}}{10^5}$

Kolom (10) : *bursting pipe safety factor*, ( $SF = \frac{221}{\text{load service}} > 2$ )

Dari hasil perhitungan tabel di atas, dapat diketahui bahwa tekanan tertinggi, yaitu 18,84 bar, terjadi pada model seri B (variasi d2 diameter pipa *surge tank* 5,73 cm; variasi L1 panjang pipa pesat 156 cm; tinggi air tampungan 28 cm). Sementara, tekanan air dalam pipa terendah yaitu 11,94 bar terjadi pada model D (variasi d2 diameter pipa *surge tank* 5,73 cm; variasi L2 panjang pipa pesat 120 cm; tinggi air tampungan 28 cm). Tekanan air dalam pipa pada variasi d1 menghasilkan

angka rata-rata 14,60 bar; sedangkan tekanan pada variasi d2 menghasilkan angka rata-rata 15,1 bar.

#### b. Persamaan Waktu Gelombang *Water Hammer*

Fenomena transmisi gelombang akibat penutupan katup dipengaruhi oleh percepatan gelombang dan arah balik gelombang sepanjang pipa (*closed conduit*) sampai gelombang menjadi stabil akibat gaya gesek pipa. Menurut teori *water hammer* oleh Allievi (1970), tekanan aliran air akan muncul sepanjang pipa *penstock* dan bergerak dengan kecepatan  $c$  (Persamaan 2 hal 71).

Waktu yang diperlukan oleh aliran air untuk bergerak sepanjang pipa *penstock* ke permukaan terbuka adalah panjang pipa *penstock* ( $L$ , m) dibagi dengan kecepatan aliran dalam pipa ( $c$ , m/s).

$$T = \frac{L}{c} \quad (4.6)$$

Sementara, waktu transmisi gelombang saat katup pada ujung pipa ditutup adalah sebagai berikut:

$$T_w = \frac{4L}{c} \quad (4.7)$$

Berikut adalah waktu gelombang *water hammer* yang dihitung sesuai dengan variasi panjang pipa *penstock*.

Tabel 4. 8 Waktu Gelombang *Water Hammer* pada Variasi L1, L2, L3

| Variasi L | Panjang Pipa<br><i>Penstock</i> | $T_w$   |
|-----------|---------------------------------|---------|
|           | (m)                             | (detik) |
| (1)       | (2)                             | (3)     |
| L1        | 1.56                            | 0.004   |
| L2        | 1.2                             | 0.003   |
| L3        | 0.84                            | 0.002   |

Keterangan:

Kolom (1) : Variasi panjang pipa *penstock*,  $L$

Kolom (2) : Panjang pipa *penstock* masing-masing variasi

Kolom (3) :  $tw = \frac{4L}{c} = \frac{4 \times (1.56 \text{ m})}{1483,17 \text{ m/s}} = 0,004 \text{ detik}$

Dari tabel di atas, waktu rata-rata yang diperlukan aliran untuk mengalir sepanjang pipa *penstock* saat katup ditutup secara cepat adalah 0,003 detik. Semakin pendek jarak pipa *penstock*, maka waktu yang diperlukan aliran untuk bertransmisi akan semakin cepat.

### c. Kehilangan Energi Akibat Gaya Gesek

Kehilangan energi adalah pengurangan ketinggian aliran air selama air mengalir di dalam pipa yang diakibatkan oleh gaya gesekan air dengan dinding pipa. Kehilangan energi akibat gaya gesek  $H_f$  dihitung berdasarkan persamaan Darcy-Weisbach:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.8)$$

Keterangan:

$H_f$  : kehilangan energi akibat gaya gesek

$f$  : faktor gaya gesek

$L$  : panjang pipa (m)

$D$  : diameter pipa (m)

$v$  : kecepatan aliran (m/s)

$g$  : percepatan gravitasi,  $9,8 \text{ m/s}^2$

Faktor  $f$  adalah fungsi dari kecepatan ( $v$ ; m/s), kekasaran, kekentalan air ( $\nu = 1,002 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) dan diameter pipa. Digunakan perhitungan dengan menggunakan angka Reynolds seperti berikut:

$$\text{Re} = \frac{vD}{\nu} \quad (4.9)$$

Untuk mengetahui kehilangan energi akibat gaya gesek dalam penelitian ini adalah:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{vD}{\nu} \\ &= \frac{0,94 \times 0,055}{1,002 \times 10^{-6}} \\ &= 51596,8 \end{aligned}$$

$\text{Re} > 4000$ , aliran turbulen.

$$\begin{aligned} f &= 0,316 \times \text{Re}^{-0,25} \\ &= 0,316 \times (51596,8)^{-0,25} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$f = 0,02$$

Maka, kehilangan energi akibat gaya gesek  $H_f$  dihitung berdasarkan persamaan Darcy-Weisbach:

$$H_f = 0,02 \times \frac{1,56}{0,055} \times \frac{0,94^2}{2 \times 9,81} \quad (4.11)$$

$$= 0,026 \text{ m}$$

Jadi, tinggi kehilangan energi akibat gaya gesekan pada pipa *penstock* adalah 0,026 m atau 2,6 cm.

Berikut adalah perhitungan kehilangan energi dalam setiap variasi pipa *penstock* akibat gaya gesek:

Tabel 4. 9 Kehilangan Energi Akibat Gaya Gesek pada Pipa *Penstock*

| Model Seri | L    | Kecepatan<br>air di pipa | Re       | Hf   |
|------------|------|--------------------------|----------|------|
|            | (m)  | (m/detik)                |          | (m)  |
| (1)        | (2)  | (3)                      | (4)      | (5)  |
| 1          | 1.56 | 0.94                     | 51450.23 | 0.14 |
| 2          | 1.56 | 0.99                     | 54577.84 | 0.16 |
| 3          | 1.2  | 1.05                     | 57788.3  | 0.14 |
| 4          | 1.2  | 1.02                     | 56183.07 | 0.13 |
| 5          | 0.84 | 0.96                     | 52731.83 | 0.08 |
| 6          | 0.84 | 0.94                     | 51367.38 | 0.08 |
| A          | 1.56 | 0.98                     | 53935.75 | 0.16 |
| B          | 1.56 | 1.27                     | 69731.22 | 0.26 |
| C          | 1.2  | 0.90                     | 49312.69 | 0.10 |
| D          | 1.2  | 0.81                     | 44191.06 | 0.08 |
| E          | 0.84 | 1.11                     | 61187.61 | 0.11 |
| F          | 0.84 | 1.03                     | 56768.51 | 0.09 |

Keterangan:

Kolom (1) : model seri

Kolom (2) : variasi panjang pipa *penstock* sesuai dengan model (m)

Kolom (3) : kecepatan aliran air pada pipa (m/s)

Kolom (4) : bilangan Reynolds (perhitungan Persamaan 6)

Kolom (5) : kehilangan tinggi air akibat gaya gesek pada pipa *penstock* (m)

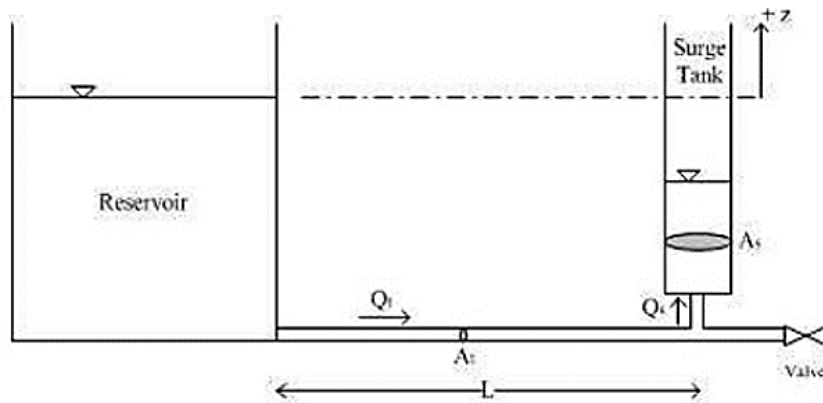
Berdasarkan Tabel 4.9 di atas, dapat disimpulkan bahwa semakin pendek pipa *penstock*, kehilangan energi akibat gaya gesek yang dihasilkan akan semakin

kecil. Pada penelitian ini, kehilangan energi akibat gaya gesekan pada pipa *penstock* rata-rata adalah 10% dari total panjang pipa *penstock*.

#### d. Perhitungan *Surge Tank*

Berikut adalah tipe *reservoir* yang dilengkapi *surge tank* dan terhubung dengan jalur pipa dengan katup pada bagian ujungnya. Standar pengoperasiannya adalah ketika air mengalir dari *reservoir* ke pipa, distribusi air akan mengalir juga ke arah pipa *Surge Tank*.

Pipa *surge tank* dengan bahan akrilik berdiameter d1 (7,64 cm) dan d2 (5,73 cm). Sementara pipa *conduit* berprofil berkelok dengan total panjang 450 cm dengan diameter 5.5 cm. Rata-rata debit *outflow* adalah  $Q = 0,0024 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Gambar 4. 46 Model Reservoir dengan *Surge Tank*

Untuk menghitung amplitude osilasi dalam pipa *surge tank*, kecepatan awal aliran dalam pipa *penstock* harus diketahui.

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,055^2 \\ &= 2,4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Selanjutnya, luas permukaan dari pipa *surge* dengan variasi d1 dihitung seperti berikut:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,076^2 \\ &= 4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Persamaan (6) seperti di bawah adalah untuk menghitung amplitudo dari osilasi air pada pipa *surge tank* menurut rumus teoritis.



$$L = 2,5 \text{ m}; g = 9,81 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} Z &= Q \sqrt{\frac{L}{g \cdot A_s \cdot A_p}} \\ &= 0,022 \sqrt{\frac{2,5}{9,81 \times 0,0045 \times 0,0024}} \\ &= 0,34 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Keterangan:

Z : tinggi amplitudo osilasi (m)

Q : debit aliran (m<sup>3</sup>/detik)

L : panjang pipa *surge tank* (m)

A<sub>s</sub> : luas permukaan pipa *surge tank* (m<sup>2</sup>)

A<sub>p</sub> : luas permukaan pipa *penstock* (m<sup>2</sup>)

g : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

Jadi, amplitudo yang terjadi ketika osilasi air terjadi pada pipa *surge tank* adalah 0,34 m atau 34 cm.

Sementara, periode waktu osilasi air yang terjadi pada *surge tank* menurut rumus teoritis dihitung:

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{\frac{L \cdot A_s}{g \cdot A_p}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{2,5 \cdot 0,0045}{9,81 \cdot 0,0024}} \\ &= 4 \text{ detik.} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Berikut adalah perhitungan teoritis *surge tank*:

Tabel 4. 10 Perhitungan Teoritis Alat *Surge Tank*

| Model<br>Seri | Q                     | Diameter<br>Surge Tank | L<br><i>penstock</i> | As                | Z    | T       |
|---------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-------------------|------|---------|
|               | (m <sup>3</sup> /det) | (m)                    | (m)                  | (m <sup>2</sup> ) | (m)  | (detik) |
| (1)           | (2)                   | (3)                    | (4)                  | (5)               | (6)  | (7)     |
| 1             | 0.0022                | 0.076                  | 1.56                 | 0.004534          | 0.34 | 4       |
| 2             | 0.0024                | 0.076                  | 1.56                 | 0.004534          | 0.36 | 4       |
| 3             | 0.0025                | 0.076                  | 1.2                  | 0.004534          | 0.38 | 4       |
| 4             | 0.0024                | 0.076                  | 1.2                  | 0.004534          | 0.37 | 4       |
| 5             | 0.0023                | 0.076                  | 0.84                 | 0.004534          | 0.35 | 4       |
| 6             | 0.0022                | 0.076                  | 0.84                 | 0.004534          | 0.34 | 4       |
| A             | 0.0023                | 0.057                  | 1.56                 | 0.00255           | 0.48 | 3       |
| B             | 0.0030                | 0.057                  | 1.56                 | 0.00255           | 0.62 | 3       |
| C             | 0.0021                | 0.057                  | 1.2                  | 0.00255           | 0.44 | 3       |
| D             | 0.0019                | 0.057                  | 1.2                  | 0.00255           | 0.39 | 3       |
| E             | 0.0026                | 0.057                  | 0.84                 | 0.00255           | 0.54 | 3       |
| F             | 0.0025                | 0.057                  | 0.84                 | 0.00255           | 0.50 | 3       |

Keterangan:

Kolom (1) : model seri

Kolom (2) : debit aliran pada setiap model (m<sup>3</sup>/detik)

Kolom (3) : diameter pipa *surge tank* (m/s)

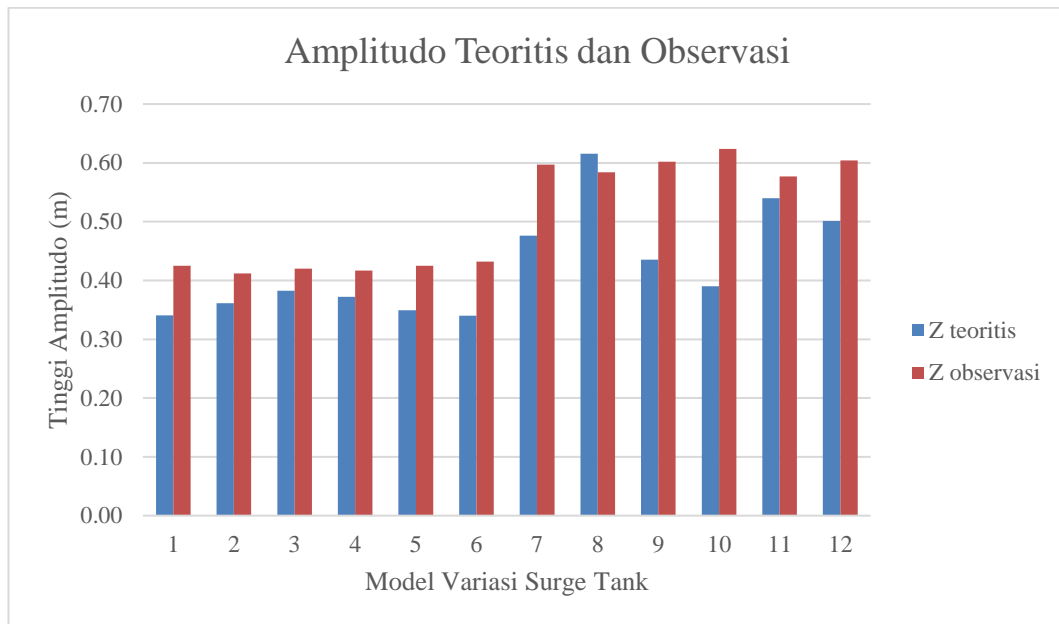
Kolom (4) : variasi panjang pipa *penstock* sesuai model (m)

Kolom (5) : luas permukaan pipa *surge tank* (m<sup>2</sup>), Persamaan 9

Kolom (6) : tinggi amplitudo osilasi (m), Persamaan 10

Kolom (7) : periode waktu osilasi (detik), Persamaan 11

Dari hasil perhitungan *surge tank* menggunakan rumus teoritis, nilai dari tinggi amplitudo osilasi massa dibandingkan dengan hasil observasi dan menghasilkan grafik seperti berikut.



Gambar 4. 47 Grafik Perbandingan Amplitudo Osilasi Teoritis dengan Hasil Observasi

Grafik di atas menunjukkan amplitudo osilasi antara teoritis dengan hasil observasi. Hasil amplitudo osilasi dari perhitungan teoritis lebih rendah daripada hasil observasi, kecuali pada model B. Amplitudo osilasi teoritis tertinggi di angka 0,62 m terjadi pada model B dengan variasi d2, L1, dan tinggi air tampungan 28 cm. Sementara amplitudo osilasi tertinggi dari hasil observasi terjadi pada model D dengan angka 0,64 m.

#### 4.5 Analisis Efektivitas *Surge Tank* Terhadap Variasi Model

Analisis efektivitas desain *Surge Tank* harus berdasarkan:

Esensi, yaitu desain yang baik dengan operasi sistem perpipaan yang dapat menahan gaya pada saat terjadi osilasi massa. Mudah, yaitu menyederhanakan metode analisis kestabilan perpipaan. Efisien, yaitu dengan konsep perhitungan untuk menurunkan tekanan pada sistem perpipaan, menghasilkan solusi dari permasalahan pada sistem perpipaan yang akurat, namun menggunakan perhitungan yang sederhana.

Dalam penelitian ini, efektivitas *surge tank* didasari oleh parameter berupa:

- 1) Elevasi Muka Air
- 2) Waktu *Steady State*

Tabel 4. 11 Ketinggian Muka Air Maksimum dan Waktu *Steady State* Setiap Variasi

| Diameter Pipa<br><i>Surge Tank</i> | Panjang Pipa<br><i>Penstock</i> | Debit           | Model Seri | Ketinggian Muka<br>Air Maksimum<br>(cm) | Waktu<br><i>Steady State</i><br>(detik) |
|------------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------|---|---|
| d1 (7.64 cm)                       | L1 (156 cm)                     | tetap           | 1          | 150                                     | 100                                     |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | 2          | 155                                     | 102                                     |
|                                    | L2 (120 cm)                     | tetap           | 3          | 149.5                                   | 91                                      |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | 4          | 155.5                                   | 114                                     |
|                                    | L3 (84 cm)                      | tetap           | 5          | 150                                     | 99                                      |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | 6          | 157                                     | 105                                     |
| d2 (5.73 cm)                       | L1 (156 cm)                     | tetap           | A          | 168                                     | 108                                     |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | B          | 173                                     | 106                                     |
|                                    | L2 (120 cm)                     | tetap           | C          | 168.5                                   | 104                                     |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | D          | 177                                     | 106                                     |
|                                    | L3 (84 cm)                      | tetap           | E          | 166                                     | 117                                     |
|                                    |                                 | <i>overflow</i> | F          | 175                                     | 103                                     |

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa dengan variasi diameter *surge tank* dan panjang *penstock* dapat merubah ketinggian muka air maksimum pada pipa dan waktu *steady state*. Hal ini dibuktikan oleh rumus teoritis *water hammer* dan *surge tank* pada sub bab 4.3.4, karena luas permukaan pipa *surge* dan panjang pipa *penstock* menentukan tinggi dan waktu osilasi teredam. Variasi d1 model 1 dan 2 dapat mereduksi osilasi teredam air saat terjadi efek *water hammer* lebih baik daripada variasi d2. Jadi, desain *surge tank* yang paling efektif dalam meredam osilasi aliran air adalah pipa *surge tank* dengan diameter 7,64 cm dengan panjang pipa *penstock* 156 cm.

#### 4.6 Kendala Penelitian

- 1) Tidak terdapat alat ukur debit yang digunakan dalam penelitian menggunakan alat *surge tank*. Pengukuran debit *outflow* dilakukan secara manual, yaitu dengan mengukur volume air tertampung yang keluar dari alat *surge tank* berdasarkan waktu yang telah ditentukan (tiga detik). Alat yang digunakan adalah gelas ukur dan *stopwatch*. Dengan metode perhitungan seperti ini, diperlukan ketelitian dalam pengerjaan.

Solusi:

Pengukuran debit dikalibrasikan dengan menggunakan rumus hubungan volume dan waktu. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, dilakukan beberapa kali pengukuran (minimal tiga kali) dengan lama waktu yang sama. Hasil dari debit *outflow* berdasarkan tiga kali pengukuran akan dirata-rata. Sehingga, debit *outflow* yang dihitung dari alat *surge tank* dianggap sudah akurat.

Kesimpulan:

Debit *outflow* harus dihitung secara tepat dan teliti agar analisis dan perhitungan dapat dilakukan secara optimal.

- 2) Profil pipa *conduit* alat *surge tank* tidak sesuai dengan rumus teoritis yang digunakan. Akibat profil pipa *conduit* alat *surge tank* yang berkelok, aliran air akan mengalami kehilangan energi akibat gesekan dan perubahan bentuk profil pipa.

Solusi:

Digunakan kecepatan aliran yang dianggap seragam sepanjang pipa *conduit*.

Kesimpulan:

Profil pipa *conduit* dianggap lurus dengan kecepatan aliran dalam pipa diasumsikan sama.

- 3) Tidak ada alat yang dapat menghitung kecepatan aliran di dalam pipa. Kecepatan aliran awal berfungsi untuk menghitung *wave velocity* saat terjadi *water hammer*.

Solusi:

Kecepatan aliran awal (*initial wave velocity*) dihitung dengan rumus teoritis. Hasil dari kecepatan aliran awal yang dihitung dianggap sudah mewakili kecepatan pada pipa yang sesungguhnya.

Kesimpulan:

Kecepatan aliran awal sebagai dasar perhitungan dan analisis hasil dihitung dengan rumus teoritis.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang telah diuraikan pada Bab 4, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil analisis pengamatan terhadap elevasi muka air maksimum pada *surge tank* menggunakan dua variasi pipa *surge tank* berdiameter 7,64 cm (d1) dan 5.73 (d2). Dari pengamatan dan analisis yang dilakukan, pipa *surge tank* berdiameter 7.64 cm dapat mereduksi elevasi muka air sampai 21,5cm dibandingkan dengan pipa berdiameter 5.73 cm. Hal ini karena elevasi muka air pada pipa *surge tank* dipengaruhi oleh luas permukaan pipa *surge tank*.
2. Berdasarkan hasil pengamatan uji fisik laboratorium dan hasil analisis, pipa *penstock* model L1 dengan panjang 156 cm menghasilkan elevasi muka air maksimum yang lebih rendah dan waktu *steady state* lebih cepat dibandingkan dengan model L2 (120 cm) dan L3 (84 cm). Kecepatan perambatan (*velocity of propagation*) akan semakin berkurang jika pipa *penstock* bertambah panjang. Waktu osilasi massa yang dihasilkan pipa L1 lebih cepat dalam mencapai *steady state flow*.
3. Pengamatan bentuk siklus tekanan air yang terjadi di alat *surge tank* dilakukan terhadap 12 variasi dengan dua model diameter pipa *surge tank* dan tiga panjang pipa *penstock* yang berbeda. Bentuk dari siklus tekanan air menunjukkan hubungan antara elevasi muka air pada *surge tank* dengan waktu osilasi massa. Hubungan antara kedua variabel ini adalah eksponensial regresi asimtot dengan persamaan:  
Tinggi muka air =  $K1 + K2 \times e^{(-K3 \times \text{waktu osilasi massa})}$
4. Berdasarkan hasil observasi dan perhitungan terhadap elevasi muka air dan waktu osilasi massa, model *surge tank* dengan diameter pipa 7.64 cm dan panjang pipa *penstock* 156 cm menghasilkan angka peredaman amplitudo dan waktu osilasi lebih efektif dibandingkan variasi lainnya.

## 5.2 Saran Penelitian

Berdasarkan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah disampaikan pada subbab 5.1, saran yang dapat Penulis berikan adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengamatan tinggi elevasi maksimal pada *surge tank*, variasi panjang pipa *penstock* L3 memiliki kemampuan mereduksi osilasi massa air lebih baik dari model asli alat *surge tank*. Untuk menyempurnakan variasi L3 ini, maka dapat dilakukan peninjauan lebih lanjut terhadap panjang *penstock* agar alat *surge tank* menjadi lebih efektif.
2. Model alat *surge tank* pada penelitian ini masih belum efektif untuk menjadi alat eksperimen. Keterbatasan alat *surge tank* laboratorium yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada profil pipa *conduit* yang tidak mewakili alat *surge tank* pada sistem PLTA eksisting. Oleh karena itu, dapat dilakukan kajian lebih lanjut pada pemasangan atau profil pipa *conduit* agar penelitian selanjutnya dapat bekerja lebih efektif.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abuiziah, A. Oulhaj, K. Sebari, D. Ouazar. 2013. *Sizing the Protection Devices to Control Water Hammer Damage*. International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:7, No:11.
- ADAM, Nicolas J. ; Giovanni DE CESARE ; Anton J. SCHLEISS ; Cécile MUENCH-ALLIGNÉ . 2016. *Characterization of Hydraulic Behavior of Surge Tanks Orifices*. Swiss Competence Center on Supply for Electricity Annual Conference.
- Bergant, A. 2005. *Water Hammer with Column Separation: A Historical Review*. Journal of Fluids and Structures 22, 135 – 171.
- Bier, P.J. 1997. *Welded Steel Penstocks*. Washington: Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior.
- Bulu, Atil. 2012. *Hydroelectric Power Plant*. Turkey: Istanbul Technical University.
- Daka, Ermal. 2015. *Analysis of a hydraulic surge tank model*. Graz: TUGRAZonline.
- Elbashir, Mosab A. Magzoub. 2007. *Hydraulic Transient in a Pipeline*. Sweden : Lund University.
- Featherstone, R.E. & Nalluri, C. 2001. *Civil Engineering Hydraulics*. Wiley: Fourth Edition.
- G. Gjetvaj, M. Tadić. 2014. “*The Effect of Water Hammer on Pressure Increases in Pipelines Protected by an Air Vessel*,” *Technical Gazette*, vol. 21.
- Garg, Rahul Kumar. 2018. *Water Hammer Analysis of a Run-of-River Hydroelectric Power Plant in Lower Himalaya*. Indian Institute of Technology Roorkee.

- Gomsrud, Daniel. 2015. *Design of a Surge Tank Throttle for Tonstad Hydropower Plant*. Norwegian University of Science and Technology.
- Houghtalen, Robert J. & Hwang, C. 1996. *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. Pearson: Third Edition.
- King, Horace W. 1996. *Handbook of Hydraulics*, Eighth Edition. McGraw- Hill. Education.
- Landskaug, Robert Stigen. 2015. *Physical Modelling of Surge Tank Throttling*. Norwegian University of Science and Technology.
- Loeb, Magalhaes, & Mahanna. 2014. *Water Hammer and Surge Tanks*. Washington.
- Lüdecke, Horst-Joachim. 2006. *The Problem of Water Hammer*. Germany: KSB.
- Moghaddam, A. 2003. *Analysis and design of simple surge tanks*. Vol: 1-7.
- Mosonyi, Emil F. 1960. *Hydropower*, vol. III. Institute for Water Resources Management, University of Karlsruhe, Germany.
- Nabil, G. & Kashif, M. (2011) “*Hydraulic Transient Analysis of Surge Tanks: Case Study of Satpara and Golen Gol Hydropower Projects in Pakistan*”, Pak. J. Engg. & Appl. Sci, Vol. 8, 2011.
- Naidu, B.A. 1973. *Surge Tanks for Hydel Power Stations*. India: University of Roorkee.
- Pipe Surge and Water Hammer Experiment*, UK Essay, 2013.
- A, Ramadan dan H, Mustafa. 2013. “*Surge Tank Design Considerations for Controlling Water Hammer Effects at Hydro-Electric Power Plants*,” *University Bulletin*, vol. 3.
- Reynolds, Osborne. 1883. *An Exxperimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels*. Proceedings of the Royal Society of London, Volume 35.

Richter, W. 2015. *Hydraulic Design and Modelling of Large Surge Tanks*. Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Graz University of Technology, Austria.

Sandvåg, Simon Utseth. 2016. *Surge Tank Atlas for Hydropower Plants*. Norwegian University of Science and Technology.

Wylie, E. Benjamin. 1993. *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall.

Suroso, Agus. 2017. *Osilasi Persamaan Diferensial Linear*. Fluid Mekanika.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN

Berita Acara Seminar Tesis

### PROGRAM PASCASARJANA INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA

#### BERITA ACARA SEMINAR TESIS

Pada :  
Hari : Senin  
Tanggal : 7 Januari 2019  
Jam : 09.00 WIB  
Tempat : R. E204-B, PPs Sipil ITS






telah dilaksanakan ujian seminar tesis :

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis pada lembar terpisah)

*Sesuai catatan*


#### Panelis/Pembahas

| No. | Nama                                | Tanda Tangan  | No. | Nama                              | Tanda Tangan  |
|-----|-------------------------------------|---|-----|-----------------------------------|---|
| 1.  | Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc. |  | 4.  | Dr. Mahendra Andiek M., S.T. M.T. |  |
| 2.  | Dr.techn. Umboro L., S.T. M.Sc.     |  | 5.  | Dr. Ir. Edijatno                  |  |
| 3.  | Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.        |  | 6.  |                                   |   |

Mengetahui,  
Ketua Program Studi

Endah Wahyuni, S.T. M.Sc. Ph.D.  
NIP : 19700201 199512 2 001

Surabaya, 7-1-2019  
Pimpinan Sidang

  
NADJADJI ANWAR  
Nama Terang

Catatan : dibuat rangkap 4 (empat)

1. Kantor PPs ITS
2. Koordinator Program Studi
3. Dosen Pembimbing
4. Mahasiswa Ybs.

[illegible]

(Dr.techn. Umboro L., S.T. M.Sc.)

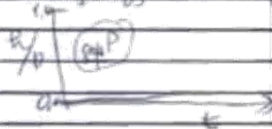
PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA

CATATAN REVISI  
SEMINAR TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

① Tampilkan grafik silsilis tekanan sebagai sumbu Y nya  
dimensionless. dy yg ditampulkan ben



② nomorurut equation →

③ banyak hal yg dapat ditampulkan yg membuat  
thesis ini lebih sempurna

Surabaya,  
Dosen Penguji

*Handwritten signature of Dr. Ir. Wasis Wardoyo*

(Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.)

**PROGRAM PASCASARJANA**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA**

CATATAN REVISI  
SEMINAR TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

- Bagaimana korosi?
- Reaktor tidak leak?
- Reaktor penomoran rumus.
- H/D → apakah dimensional parameter?
- Tekanan & uap air? Dipertegas.

Surabaya,  
Dosen Penguji



(Prof. Dr. Ir. Nadjati Anwar, M.Sc.)





PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA

CATATAN REVISI  
SEMINAR TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

*Perbaikan di bagian*

Surabaya,  
Dosen Penguji



(Dr. Mdhendra Andiek M., S.T. M.T.)

PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA

BERITA ACARA  
UJIAN TESIS

Pada :  
Hari : Senin  
Tanggal : 7 Januari 2019  
Jam : 09.00 WIB  
Tempat : R. E204-B, PPs Sipil ITS

telah dilaksanakan ujian tesis :

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air





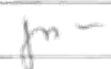
Dengan hasil :

1. Lulus
2. Lulus dengan perbaikan/penyempurnaan
3. Tidak lulus atau mengulang

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis pada lembar terpisah)

*sesuai catatan*

Panelis/Pembahas.

| No. | Nama                                | Tanda Tangan  | No. | Nama                              | Tanda Tangan  |
|-----|-------------------------------------|---|-----|-----------------------------------|---|
| 1.  | Prof. Dr. Ir. Nadjadji Anwar, M.Sc. |  | 4.  | Dr. Mahendra Andiek M., S.T. M.T. |  |
| 2.  | Dr.techn. Umboro L., S.T. M.Sc.     |  | 5.  | Dr. Ir. Edijatno                  |  |
| 3.  | Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.        |  | 6.  |                                   |   |

Mengetahui,  
Ketua Program Studi

Endah Wahyuni, S.T. M.Sc. Ph.D.  
NIP : 19700201 199512 2 001

Surabaya, 7-1-2019  
Pimpinan Sidang

  
NADJADJI ANWAR  
Nama Terang

Catatan : dibuat rangkap 4 (empat)

1. Kantor PPs ITS
2. Koordinator Program Studi
3. Dosen Pembimbing
4. Mahasiswa Ybs.

CATATAN REVISI  
UJIAN TESIS

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

(Dr.techn. Umboro L. S.T. M.Sc.)

**PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**

CATATAN REVISI  
UJIAN TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

- Tulus landasan awal hidrolika .

Surabaya,  
Dosen Penguji

(Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.)

**PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**

CATATAN REVISI  
UJIAN TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

- Jurnal gambar 2.1a yang perlu diperbaiki
- Hipotesis menjadi  $H_1 \rightarrow$  fungsi  $P$  dan  $L$
- Bukti kuantitatif dengan angka kuantitatif  
(nilai koefisien)
- Kesimpulan  $\rightarrow$  Hasil perlu, ya penting, nilai air
- Grafik 4.4i dosis belahan minimum  
 $\rightarrow$  dengan grafik belah sapi?
- Dokumentasi foto, wawancara penelitian, proses  
kunjungan
- Rangkuman dari literatur yang
- Grafik 10  $\rightarrow$  masalah/curva dari steady/unsteady?  
Batasan konvergensi
- Kesimpulan  $\rightarrow$  simpulan dengan kuantitatif

Surabaya,  
Dosen Penguji



(Prof. Dr. Ir. Nadjadi Anwar, M.Sc.)

CATATAN REVISI  
UJIAN TESIS

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

(Dr. Ir. Edijatno)

**PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA**

CATATAN REVISI  
UJIAN TESIS

Judul : Efektifitas Design Surge Tank untuk Mengendalikan Efek Water Hammer Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air  
Oleh : Anindita Hanalestari Setiawan  
NRP. : 03111750050010  
Program Studi : Teknik Sipil  
Bidang Keahlian : Manajemen dan Rekayasa Sumber Air

Perbaikan/penyempurnaan yang harus dilakukan adalah :  
(kalau perlu dapat ditulis di lembar terpisah)

*for caption di buku*

Surabaya,  
Dosen Penguji



(Dr. Mahendra Andiek M., S.T., M.T.)



**Tabel Hasil Pengamatan**

| PERCOBAAN 1 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 107.5                 | 0              |
| 2           | 35                    | 2              |
| 5           | 150                   | 3              |
| 8           | 83                    | 3              |
| 11          | 124.2                 | 3              |
| 13          | 93.8                  | 2              |
| 16          | 117.5                 | 3              |
| 20          | 98                    | 4              |
| 23          | 114                   | 3              |
| 27          | 100.5                 | 4              |
| 30          | 112                   | 3              |
| 33          | 102                   | 3              |
| 36          | 110.7                 | 3              |
| 40          | 103.2                 | 4              |
| 43          | 109.8                 | 3              |
| 46          | 104                   | 3              |
| 49          | 109                   | 3              |
| 52          | 104.8                 | 3              |
| 55          | 108.5                 | 3              |
| 59          | 105.2                 | 4              |
| 62          | 107.9                 | 3              |
| 65          | 105.6                 | 3              |
| 68          | 107.5                 | 3              |
| 72          | 105.9                 | 4              |
| 75          | 107.3                 | 3              |
| 78          | 106.2                 | 3              |
| 81          | 107.1                 | 3              |
| 84          | 106.3                 | 3              |
| 88          | 107                   | 4              |
| 91          | 106.5                 | 3              |
| 94          | 106.9                 | 3              |
| 97          | 106.6                 | 3              |
| 100         | 106.7                 | 3              |

(a)

| PERCOBAAN 2 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 113.8                 | 0              |
| 3           | 54                    | 3              |
| 6           | 155                   | 3              |
| 9           | 89                    | 3              |
| 13          | 131                   | 4              |
| 16          | 100                   | 3              |
| 19          | 124.2                 | 3              |
| 22          | 104.7                 | 3              |
| 25          | 121                   | 3              |
| 29          | 107.3                 | 4              |
| 32          | 119                   | 3              |
| 35          | 109                   | 3              |
| 38          | 117.8                 | 3              |
| 42          | 110.3                 | 4              |
| 45          | 116.9                 | 3              |
| 48          | 111.2                 | 3              |
| 51          | 116.2                 | 3              |
| 54          | 111.9                 | 3              |
| 57          | 115.7                 | 3              |
| 60          | 112.4                 | 3              |
| 64          | 115.4                 | 4              |
| 67          | 112.8                 | 3              |
| 70          | 115                   | 3              |
| 73          | 113                   | 3              |
| 77          | 114.7                 | 4              |
| 80          | 113.4                 | 3              |
| 83          | 114.5                 | 3              |
| 86          | 113.6                 | 3              |
| 89          | 114.3                 | 3              |
| 93          | 113.7                 | 4              |
| 96          | 114.2                 | 3              |
| 99          | 113.9                 | 3              |
| 102         | 114.1                 | 3              |

(b)

Gambar Lampiran. 1 Model Surge Tank d1, L1, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)

| PERCOBAAN 4 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 107.5                 | 0              |
| 2           | 41                    | 2              |
| 5           | 149.5                 | 3              |
| 8           | 82                    | 3              |
| 12          | 123.8                 | 4              |
| 15          | 93.5                  | 3              |
| 18          | 117.2                 | 3              |
| 21          | 97.8                  | 3              |
| 25          | 113.9                 | 4              |
| 28          | 100.2                 | 3              |
| 31          | 112                   | 3              |
| 34          | 101.8                 | 3              |
| 38          | 110.5                 | 4              |
| 41          | 102.8                 | 3              |
| 44          | 109.6                 | 3              |
| 47          | 103.8                 | 3              |
| 50          | 108.8                 | 3              |
| 54          | 104.4                 | 4              |
| 57          | 108.3                 | 3              |
| 60          | 104.9                 | 3              |
| 63          | 107.8                 | 3              |
| 67          | 105.3                 | 4              |
| 70          | 107.3                 | 3              |
| 73          | 105.6                 | 3              |
| 76          | 107.1                 | 3              |
| 79          | 105.8                 | 3              |
| 82          | 106.8                 | 3              |
| 85          | 106                   | 3              |
| 88          | 106.6                 | 3              |
| 91          | 106.6                 | 3              |

(a)

| PERCOBAAN 3 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 113.8                 | 0              |
| 2           | 53                    | 2              |
| 6           | 155.5                 | 4              |
| 9           | 89.5                  | 3              |
| 12          | 130.5                 | 3              |
| 15          | 99.5                  | 3              |
| 18          | 123.5                 | 3              |
| 22          | 104                   | 4              |
| 25          | 120.5                 | 3              |
| 28          | 107                   | 3              |
| 32          | 118.5                 | 4              |
| 35          | 108.5                 | 3              |
| 38          | 117.5                 | 3              |
| 41          | 110                   | 3              |
| 45          | 116.5                 | 4              |
| 48          | 111                   | 3              |
| 51          | 116                   | 3              |
| 54          | 111.5                 | 3              |
| 57          | 115.5                 | 3              |
| 61          | 112.3                 | 4              |
| 64          | 115                   | 3              |
| 67          | 112.8                 | 3              |
| 70          | 114.8                 | 3              |
| 73          | 113                   | 3              |
| 76          | 114.5                 | 3              |
| 79          | 113.3                 | 3              |
| 83          | 114.3                 | 4              |
| 86          | 113.5                 | 3              |
| 89          | 114.2                 | 3              |
| 92          | 113.6                 | 3              |
| 95          | 114                   | 3              |
| 99          | 113.8                 | 4              |
| 102         | 114                   | 3              |

(b)

Gambar Lampiran. 2 Model Surge Tank d1, L2, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)

| PERCOBAAN 5 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 107.5                 | 0              |
| 2           | 40                    | 2              |
| 5           | 150                   | 3              |
| 9           | 82.5                  | 4              |
| 12          | 124.3                 | 3              |
| 16          | 93.3                  | 4              |
| 19          | 117.2                 | 3              |
| 22          | 97.7                  | 3              |
| 25          | 113.9                 | 3              |
| 28          | 100                   | 3              |
| 32          | 112                   | 4              |
| 35          | 101.8                 | 3              |
| 38          | 110.5                 | 3              |
| 41          | 103.8                 | 3              |
| 44          | 109.7                 | 3              |
| 48          | 103.9                 | 4              |
| 51          | 108.8                 | 3              |
| 54          | 104.4                 | 3              |
| 58          | 108.1                 | 4              |
| 61          | 104.8                 | 3              |
| 64          | 107.7                 | 3              |
| 67          | 105.3                 | 3              |
| 70          | 107.2                 | 3              |
| 73          | 105.6                 | 3              |
| 77          | 107                   | 4              |
| 80          | 105.8                 | 3              |
| 83          | 106.8                 | 3              |
| 86          | 106                   | 3              |
| 89          | 106.6                 | 3              |
| 92          | 106.2                 | 3              |
| 96          | 106.5                 | 4              |
| 99          | 106.3                 | 3              |

(a)

| PERCOBAAN 6 |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 113.8                 | 0              |
| 2           | 51                    | 2              |
| 6           | 157                   | 4              |
| 9           | 89                    | 3              |
| 13          | 131                   | 4              |
| 16          | 100                   | 3              |
| 19          | 124                   | 3              |
| 22          | 104.5                 | 3              |
| 25          | 120.5                 | 3              |
| 29          | 107                   | 4              |
| 32          | 119                   | 3              |
| 35          | 108.8                 | 3              |
| 38          | 117.5                 | 3              |
| 41          | 110                   | 3              |
| 44          | 116.5                 | 3              |
| 48          | 111                   | 4              |
| 51          | 116                   | 3              |
| 54          | 111.8                 | 3              |
| 58          | 115.5                 | 4              |
| 61          | 112.3                 | 3              |
| 64          | 115                   | 3              |
| 67          | 112.5                 | 3              |
| 71          | 114.6                 | 4              |
| 74          | 113                   | 3              |
| 77          | 114.4                 | 3              |
| 80          | 113.1                 | 3              |
| 83          | 114.2                 | 3              |
| 86          | 113.3                 | 3              |
| 89          | 114                   | 3              |
| 93          | 113.4                 | 4              |
| 96          | 113.8                 | 3              |
| 99          | 113.5                 | 3              |
| 102         | 113.7                 | 3              |
| 105         | 113.6                 | 3              |

(b)

Gambar Lampiran. 3 Model Surge Tank d1, L3, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)

| PERCOBAAN C |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 108.3                 | 0              |
| 2           | 23.5                  | 2              |
| 4           | 168                   | 2              |
| 8           | 72                    | 4              |
| 10          | 134.5                 | 2              |
| 13          | 87                    | 3              |
| 15          | 124.5                 | 2              |
| 18          | 93.5                  | 3              |
| 21          | 119.5                 | 3              |
| 23          | 97                    | 2              |
| 26          | 116.5                 | 3              |
| 29          | 99.5                  | 3              |
| 31          | 114.5                 | 2              |
| 34          | 101.3                 | 3              |
| 37          | 113                   | 3              |
| 39          | 102.5                 | 2              |
| 42          | 111.8                 | 3              |
| 45          | 103.5                 | 3              |
| 47          | 111                   | 2              |
| 50          | 104.5                 | 3              |
| 53          | 110.3                 | 3              |
| 55          | 105                   | 2              |
| 58          | 109.5                 | 3              |
| 61          | 105.5                 | 3              |
| 63          | 109                   | 2              |
| 65          | 106                   | 2              |
| 69          | 108.8                 | 4              |
| 72          | 106.5                 | 3              |
| 74          | 108.5                 | 2              |
| 76          | 106.5                 | 2              |
| 79          | 108.2                 | 3              |
| 82          | 106.8                 | 3              |
| 84          | 108                   | 2              |
| 87          | 107                   | 3              |
| 90          | 107.8                 | 3              |
| 92          | 107                   | 2              |
| 94          | 107.7                 | 2              |
| 97          | 107.1                 | 3              |
| 100         | 107.5                 | 3              |
| 103         | 107.3                 | 3              |
| 105         | 107.5                 | 2              |
| 108         | 107.4                 | 3              |

(a)

| PERCOBAAN A |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 114.7                 | 0              |
| 2           | 25                    | 2              |
| 5           | 173                   | 3              |
| 9           | 79                    | 4              |
| 11          | 140.7                 | 2              |
| 14          | 93.5                  | 3              |
| 16          | 131                   | 2              |
| 19          | 100                   | 3              |
| 22          | 126.2                 | 3              |
| 24          | 103.7                 | 2              |
| 27          | 123.3                 | 3              |
| 29          | 106.5                 | 2              |
| 32          | 121.5                 | 3              |
| 35          | 108.3                 | 3              |
| 38          | 120                   | 3              |
| 40          | 109.7                 | 2              |
| 42          | 119.7                 | 2              |
| 45          | 110.7                 | 3              |
| 48          | 118                   | 3              |
| 51          | 111.5                 | 3              |
| 54          | 117.2                 | 3              |
| 56          | 112.3                 | 2              |
| 59          | 116.7                 | 3              |
| 62          | 112.7                 | 3              |
| 64          | 116.2                 | 2              |
| 67          | 113.2                 | 3              |
| 70          | 115.8                 | 3              |
| 72          | 113.6                 | 2              |
| 75          | 115.5                 | 3              |
| 78          | 113.8                 | 3              |
| 80          | 115.3                 | 2              |
| 83          | 114                   | 3              |
| 86          | 115                   | 3              |
| 88          | 114.3                 | 2              |
| 93          | 114.9                 | 5              |
| 94          | 114.4                 | 1              |
| 96          | 114.8                 | 2              |
| 99          | 114.5                 | 3              |
| 102         | 114.7                 | 3              |
| 104         | 114.6                 | 2              |
| 106         | 114.7                 | 2              |

(b)

Gambar Lampiran. 4 Model Surge Tank d2, L1, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)

| PERCOBAAN D |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 108.3                 | 0              |
| 2           | 22                    | 2              |
| 5           | 168.5                 | 3              |
| 7           | 72                    | 2              |
| 10          | 134.5                 | 3              |
| 12          | 87.3                  | 2              |
| 15          | 125                   | 3              |
| 18          | 94                    | 3              |
| 20          | 119.5                 | 2              |
| 23          | 97.3                  | 3              |
| 26          | 116.5                 | 3              |
| 28          | 99.7                  | 2              |
| 31          | 114.3                 | 3              |
| 34          | 101.5                 | 3              |
| 36          | 112.8                 | 2              |
| 38          | 103.3                 | 2              |
| 42          | 111.5                 | 4              |
| 44          | 103.8                 | 2              |
| 47          | 110.8                 | 3              |
| 49          | 104.5                 | 2              |
| 52          | 110                   | 3              |
| 55          | 105                   | 3              |
| 58          | 109.5                 | 3              |
| 60          | 105.5                 | 2              |
| 63          | 109                   | 3              |
| 65          | 106                   | 2              |
| 68          | 108.8                 | 3              |
| 71          | 106.3                 | 3              |
| 73          | 108.3                 | 2              |
| 76          | 106.8                 | 3              |
| 79          | 108.1                 | 3              |
| 82          | 107                   | 3              |
| 84          | 108                   | 2              |
| 87          | 107                   | 3              |
| 90          | 107.8                 | 3              |
| 92          | 107.3                 | 2              |
| 95          | 107.7                 | 3              |
| 98          | 107.5                 | 3              |
| 101         | 107.6                 | 3              |
| 104         | 107.5                 | 3              |

(a)

| PERCOBAAN E |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 114.6                 | 0              |
| 2           | 23                    | 2              |
| 5           | 177                   | 3              |
| 8           | 78                    | 3              |
| 11          | 141.5                 | 3              |
| 13          | 93.5                  | 2              |
| 16          | 131.5                 | 3              |
| 19          | 100                   | 3              |
| 21          | 126.5                 | 2              |
| 24          | 104                   | 3              |
| 27          | 123.5                 | 3              |
| 29          | 106.5                 | 2              |
| 32          | 121.5                 | 3              |
| 35          | 108.5                 | 3              |
| 37          | 119.8                 | 2              |
| 40          | 110                   | 3              |
| 43          | 118.6                 | 3              |
| 45          | 110.8                 | 2              |
| 48          | 117.8                 | 3              |
| 51          | 111.8                 | 3              |
| 53          | 117                   | 2              |
| 56          | 112.5                 | 3              |
| 58          | 116.5                 | 2              |
| 61          | 113                   | 3              |
| 64          | 116                   | 3              |
| 67          | 113.3                 | 3              |
| 69          | 115.8                 | 2              |
| 72          | 113.6                 | 3              |
| 75          | 115.3                 | 3              |
| 77          | 114                   | 2              |
| 80          | 115                   | 3              |
| 82          | 114.2                 | 2              |
| 85          | 114.9                 | 3              |
| 88          | 114.4                 | 3              |
| 91          | 114.8                 | 3              |
| 94          | 114.5                 | 3              |
| 97          | 114.7                 | 3              |
| 100         | 114.5                 | 3              |
| 103         | 114.6                 | 3              |
| 106         | 114.5                 | 3              |

(b)

Gambar Lampiran. 5 Model Surge Tank d2, L2, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)

| PERCOBAAN I |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 108                   | 0              |
| 2           | 30                    | 2              |
| 5           | 166                   | 3              |
| 8           | 71.5                  | 3              |
| 11          | 133.5                 | 3              |
| 14          | 86.5                  | 3              |
| 17          | 124                   | 3              |
| 19          | 93                    | 2              |
| 22          | 119                   | 3              |
| 24          | 96.5                  | 2              |
| 27          | 116                   | 3              |
| 30          | 99                    | 3              |
| 32          | 114                   | 2              |
| 35          | 100.5                 | 3              |
| 38          | 112.3                 | 3              |
| 40          | 102                   | 2              |
| 43          | 111.3                 | 3              |
| 46          | 103                   | 3              |
| 48          | 110.3                 | 2              |
| 51          | 103.8                 | 3              |
| 54          | 109.5                 | 3              |
| 56          | 104.5                 | 2              |
| 59          | 109                   | 3              |
| 62          | 104.8                 | 3              |
| 64          | 108.5                 | 2              |
| 67          | 105.3                 | 3              |
| 69          | 108.3                 | 2              |
| 72          | 105.6                 | 3              |
| 74          | 108                   | 2              |
| 77          | 106                   | 3              |
| 80          | 107.6                 | 3              |
| 83          | 106.2                 | 3              |
| 85          | 107.5                 | 2              |
| 88          | 106.3                 | 3              |
| 91          | 107.3                 | 3              |
| 93          | 106.5                 | 2              |
| 96          | 107.2                 | 3              |
| 98          | 106.6                 | 2              |
| 101         | 107.1                 | 3              |
| 104         | 106.6                 | 3              |
| 106         | 107                   | 2              |
| 109         | 106.7                 | 3              |
| 112         | 106.9                 | 3              |
| 115         | 106.8                 | 3              |
| 117         | 106.7                 | 2              |

(a)

| PERCOBAAN G |                       |                |
|-------------|-----------------------|----------------|
| detik ke-   | elevasi muka air (cm) | $\Delta t$ (s) |
| 0           | 114.6                 | 0              |
| 3           | 24                    | 3              |
| 6           | 175                   | 3              |
| 9           | 78                    | 3              |
| 12          | 141                   | 3              |
| 14          | 93.5                  | 2              |
| 17          | 131                   | 3              |
| 19          | 100                   | 2              |
| 22          | 126.3                 | 3              |
| 25          | 104                   | 3              |
| 28          | 123.3                 | 3              |
| 30          | 106.5                 | 2              |
| 33          | 121.2                 | 3              |
| 35          | 108.3                 | 2              |
| 38          | 119.8                 | 3              |
| 41          | 109.8                 | 3              |
| 44          | 118.6                 | 3              |
| 46          | 111                   | 2              |
| 49          | 117.8                 | 3              |
| 51          | 111.8                 | 2              |
| 54          | 117.3                 | 3              |
| 57          | 112.5                 | 3              |
| 60          | 116.5                 | 3              |
| 62          | 113                   | 2              |
| 65          | 116                   | 3              |
| 68          | 113.4                 | 3              |
| 70          | 115.7                 | 2              |
| 73          | 113.7                 | 3              |
| 75          | 115.4                 | 2              |
| 78          | 114                   | 3              |
| 81          | 115.2                 | 3              |
| 84          | 114.2                 | 3              |
| 86          | 115                   | 2              |
| 89          | 114.4                 | 3              |
| 91          | 114.8                 | 2              |
| 94          | 114.5                 | 3              |
| 96          | 114.7                 | 2              |
| 98          | 114.6                 | 2              |
| 103         | 114.6                 | 5              |

(b)

Gambar Lampiran. 6 Model Surge Tank d2, L3, Tampungan 22,5 cm (a) dan Tampungan 28 cm (b)



Anindita Hanalestari Setiawan, S.T.

Penulis dilahirkan di Banyuwangi pada tanggal 5 Juni 1995, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Dharma Wanita (Lampung), SD Al-Kautsar (Lampung), SMP Negeri 2 (Lampung), SMA Negeri 2 (Lampung), dan Program Sarjana Teknik Sipil ITS.

Setelah lulus dari S1 Teknik Sipil ITS tahun 2017, Penulis diterima di Program Magister Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS terdaftar dengan NRP 03111750050010. Di Program Magister Jurusan Teknik Sipil ini Penulis mengambil bidang studi MRSA (Manajemen Sumber Daya Air). Semasa perkuliahan S1 dan S2, Penulis aktif dalam berbagai kepanitiaan di Himpunan Mahasiswa Sipil (HMS) ITS dan kegiatan kampus, serta aktif dalam kepanitiaan seminar nasional dan internasional.

*(Email: ahanalestari@gmail.com)*